

Universidad de **Cádiz**

TESIS DOCTORAL

**Caracterización de las comunicaciones
PLC en las líneas de corriente continua
de un campo solar fotovoltaico.**

Diego Sales Lérída

Departamento de Ingeniería
Eléctrica

Director : **Rafael Jiménez Castañeda**



Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Cádiz

TESIS DOCTORAL

**CARACTERIZACIÓN DE LAS COMUNICACIONES PLC EN LAS
LÍNEAS DE CORRIENTE CONTINUA DE UN CAMPO SOLAR
FOTOVOLTAICO**

Diego Sales Lérída
Cádiz, Noviembre 2015

CARACTERIZACIÓN DE LAS COMUNICACIONES PLC EN LAS LÍNEAS DE CORRIENTE CONTINUA DE UN CAMPO SOLAR FOTOVOLTAICO

Memoria presentada por el Ingeniero **Diego Sales Lérída** para optar al **Grado de Doctor** por la Universidad de Cádiz.

Fdo.: **Diego Sales Lérída**
Cádiz, Noviembre 2015

La presente tesis doctoral ha sido dirigida por el **Doctor D. Rafael Jiménez Castañeda**, Profesor Titular del Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Cádiz, y cumple con los requisitos exigidos por la legislación vigente.

El Director:

Fdo.: **Dr. D. Rafael Jiménez Castañeda**

VºBº

Fdo.: **D. Germán Jiménez Ferrer**
Secretario del Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Cádiz

DEDICATORIA

A mi padre que recibe toda mi admiración y es el espejo del cual reflejarme, el cual ha estado volcado en nuestros estudios desde pequeño y ahora en nuestras carreras, claro está, en las ocasiones libres en las que dejaba de desvivirse por sacar adelante su universidad para hacerlo por sus hijos.

A mi madre por su lucha incesante computando sus dos trabajos, profesional y hogar. Para ti que eres una luchadora, por seguir sacando esta familia adelante.

A mi familia, amigos y compañeros que han estado cerca todo este tiempo y han aportado su granito de arena con su aliento, consejos y ánimos.

A mi querido Director de tesis, que siempre estuvo en los momentos puntuales en los que requería su imprescindible ayuda.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quería ofrecer mi más profundo agradecimiento a mi director, el **Profesor Doctor Rafael Jiménez Castañeda**. Desde el primer momento me supo acoger como tutor y guía de los trabajos realizados e impulsó y orientó los estudios de la misma a un área afín a ambos, ligado a mi carrera como Ingeniero de Telecomunicaciones. Gracias Rafael por compartir tu sapiencia y por el tiempo dedicado, que sé que es muy valioso.

Quiero agradecer también a mi tutor de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, el **Profesor Doctor Raúl Balderas Navarro** porque estuvo muy involucrado en los comienzos de la tesis, por sus clases magistrales en las materias impartidas al comienzo del mismo y las reuniones técnicas mantenidas.

A los **Profesores Doctores Ricardo Hernández Molina y José Luis Cueto Ancela** por su acogida este tiempo en el laboratorio que me ha servido de nexo para aplicar algunas tecnologías aprendidas este último año y medio. Al **Profesor Doctor Luis Antonio Mariscal Rico** por compartir su conocimiento en el área de las telecomunicaciones en los comienzos para la aplicación de los primeros experimentos realizados. Al **Ingeniero Informático Javier Priego Ramírez** por su ayuda en la configuración de la plataforma de visualización web.

Agradecer al **Departamento de Ingeniería Eléctrica** de la Universidad de Cádiz, en cuyo laboratorio de energía solar fotovoltaica se ha desarrollado parte de la experimentación de la presente tesis doctoral.

Por último y no menos importante, agradecer al **Consejo de Ciencias y Tecnologías de México** (CONACYT) por concederme la Beca Predoctoral para el inicio del período de investigación para la realización de la presente Tesis Doctoral.

INDICE

INDICE	1
0. Resumen y estructura de la Tesis	9
1. Antecedentes y Objetivos	15
1.1 Estado actual de las redes de telecomunicación.	17
1.2 Eficiencia energética. Integración de las comunicaciones en las redes eléctricas, <i>Smartgrids</i>	21
1.2.1 Comunicaciones y objetivos de la Unión Europea sobre la eficiencia energética.	22
1.2.2 SmartGrids, evolución y objetivos.....	29
1.3 Fuentes de energía distribuida. Energías Renovables.....	36
1.3.1 Implantación de Energías Renovables	39
1.3.2 Energía Solar Fotovoltaica. Desarrollo actual.....	40
1.4 Power Line Communication. Estado del arte.	47
1.4.1 Breve Introducción.....	47
1.4.2 Antecedentes.....	49
1.4.3 Parámetros característicos de una línea de potencia.	51
1.4.4 Estado actual y soluciones adoptadas.....	52
1.5 Objetivos del trabajo de investigación	55
1.5.1 Objetivo General.....	55
1.5.2 Objetivos Particulares.....	55
1.6 Hipótesis planteadas	55
1.7 Plan de trabajo	56
2. Caracterización del Sistema Objeto de Estudio.....	57
2.1 Sistema Solar Fotovoltaico.....	59
2.1.1 Modelo teórico Campo Solar Fotovoltaico	61
2.1.2 Modelo teórico Generador Fotovoltaico.....	61

2.1.3	Curva I/V de un campo solar fotovoltaico.	63
2.1.4	Modelo te3rico Inversor	66
2.1.5	Cableado	68
2.2	Caracterizaci3n del medio.....	70
2.2.1	Espectro de frecuencia. Medios de transmisi3n.	70
2.2.2	Modelo de l3nea de transmisi3n	72
2.3	Filtros	83
2.4	Modulaci3n de la se3al.....	88
3.	Metodolog3a de Dise3o del Modelo para pruebas simuladas y experimentales	95
3.1	Adaptaci3n se3al de informaci3n a campo solar fotovoltaico.....	98
3.2	Antecedentes. Primeras pruebas en la red de adaptaci3n para la se3al de informaci3n mediante filtros.	100
3.2.1	Validaci3n experimental instalaciones del Laboratorio de Energ3a Solar.	107
3.3	Simulaciones esquema completo.....	113
3.4	Simulaci3n introduciendo un modulador PSK.	121
4.	Plataforma de Tratamiento Y Visualizaci3n de datos	127
4.1	Arduino para transmisi3n de datos hacia el servidor WEB.....	130
4.2	Servidor WEB y visualizaci3n de los datos en interfaz gr3fica	136
4.2.1	Tecnolog3a de la capa de servicios.....	137
4.2.2	Elecci3n de la tecnolog3a para el desarrollo de la capa de cliente y de presentaci3n:	137
4.2.3	Web services (Capa servidor).....	138
4.2.4	Aplicaci3n web.....	139
4.2.5	Aplicaci3n m3vil	141
4.3	Programa realizado en Arduino para la transmisi3n de la informaci3n al servidor WEB.	144

5. Conclusiones y Consideraciones Generales	149
6. Referencias Bibliogr3ficas	153

ACRÓNIMOS

AC - Alternating Current (Corriente alterna).

ADSL - Asymmetric Digital Subscriber Line (Línea de abonado digital asimétrica).

AJAX - Asynchronous JavaScript and XML.

AM - Modulación en amplitud.

API - Application Programming Interface (Aplicación interfaz de programación).

ASK - Amplitude-shift keying (Modulación por desplazamiento en amplitud).

BP - Band-Pass (Filtros paso de banda).

BR - Filtros rechazo de banda.

C – Capacitancia.

CAN - Controller Area Network.

CSS3 - Cascading Style Sheets.

CSV - Comma-separated values (Valores Separados por Comas).

DC - Direct Current (Corriente continua).

DS2 - Defense Support Services (Servicios de Apoyo de Defensa).

EM – Electromagnéticas.

EMC - Electromagnetic Compatibility (Compatibilidad electromagnética).

EPRI - Electric Power Research Institute (Instituto de investigación de potencia eléctrica).

ETP - European Technology Platform (Plataforma Tecnológica Europea).

FCC _ Federal Communications Commission (Comisión federal de comunicaciones de los Estados Unidos de América).

FED - Fuentes de energía Distribuidas.

FER - Fuentes de Energía Renovables.

FM – Modulación en frecuencia.

FSK - Frequency Shift Keying (Modulación por desplazamiento en frecuencia).

GPRS – General Packet Radio Service (Servicio general de paquetes vía radio).

GPS – Global Positioning System (Sistema de Localización Mundial).

HDTV - TV in high Definition (Televisión en alta definición).

HP - High-Pass (Filtros paso de alta).

HPAV - HomePlug AV.

HTTP - Hypertext Transfer Protocol.

IDE - Entorno de desarrollo integrado.

IEA - International Energy Agency (Agencia energético internacional).

PVPS - Photovoltaic Power Systems Programme (Programa de Sistemas de Energía Fotovoltaica).

IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolar de Puerta Aislada).

IP - Internet Protocol (Protocolo de internet).

jQuery - Plataforma de desarrollo de JavaScript.

JSON - JavaScript Object Notation.

LAN - Local Area Network (Red de área local).

LIN - Local Interconnect Network.

LP - Low-Pass (Filtros paso de baja).

LTi - Linear Time Invariant (Lineal e invariante en el tiempo).

LLC - Limited liability company (Compañía de responsabilidad limitada).

OC - Open Circuit.

PAE4+ - Plan de Acción de Eficiencia Energética a nivel comunitario.

PLC- Power Line Communication.

PM – Modulación en fase.

POST - Acceso y parametrización de datos a través de url.

PSK - Phase shift keying (modulación por desplazamiento en fase).

PUA - PLC Utilities Alliance (Alianza de utilidades PLC).

PVPS - Photovoltaic Power Systems Programme.

R – Resistencia.

R.D. - Real Decreto.

RA - Research Area.

RAM – Random Access Memory (Memoria de acceso aleatorio).

REST - Representational State Transfer.

SC - Short-Circuit.

SDD - Strategic Deployment Document (Documento de despliegue estratégico).

SDTV -TV Digital System (Sistema de televisión digital)

TE - Modo transversal eléctrico.

TEM - Modo transversal electromagnético.

TIR - Tarifa de inyección a red.

TM - Modo transversal magnético.

UPA - Universal Powerline Association (Asociaci3n universal de l3neas de potencia).

XML - Extensible Markup Language (Lenguaje de Marcas Extensible).

CAPÍTULO 0

Resumen y estructura de la Tesis

El presente trabajo de tesis doctoral estudia la caracterización de las líneas de potencia de corriente continua de un campo solar fotovoltaico para la transmisión de información a través de ellas. Para ello ha sido necesario modelar teóricamente cada uno de los elementos significativos presentes en el sistema solar fotovoltaico mediante su circuito equivalente y establecer los algoritmos para la obtención de los parámetros que caracterizan el comportamiento del mismo.

La memoria de la tesis doctoral se ha dividido en cinco capítulos cuyo contenido se describe a continuación:

Capítulo 1: Antecedentes y Objetivos.

El capítulo comienza situando en el contexto actual la temática de la tesis dentro las redes de telecomunicaciones existentes y de los objetivos 20-20-20 de la Unión Europea, en concreto, en la evolución de las SmartGrids o redes de electricidad inteligente, donde la integración de las comunicaciones es uno de los factores fundamentales a estudiar.

El capítulo continúa tratando el estado actual de la integración de las fuentes de energía distribuida en la red eléctrica, especialmente las renovables, entre las que se encuentra la energía solar fotovoltaica. Se analiza la evolución de los sistemas solares fotovoltaicos y la evolución del mercado fotovoltaico.

Concluye con el estado del arte, exponiendo algunas de las soluciones propuestas en entornos similares por otros investigadores en años recientes, los objetivos de la tesis, hipótesis planteadas y el plan de trabajo que se ha llevado a cabo para alcanzar los objetivos marcados.

Capítulo 2: Caracterización del sistema objeto de estudio

En este capítulo se efectúa el desarrollo teórico necesario para su aplicación en las pruebas experimentales simuladas. Para ello, se han obtenido los modelos matemáticos que rigen el comportamiento de cada uno de los

elementos presentes en un sistema solar fotovoltaico, poniendo mayor énfasis en el procedimiento para caracterizar la línea de potencia, puesto que, al emplear frecuencias de transmisión altas, la aplicación de circuitos equivalentes dejan de ser válidos en el ámbito de la teoría de circuitos eléctricos donde algunos parámetros son despreciados.

El capítulo continúa con una introducción puntual sobre filtros y se describen algunos de los tipos de filtros más característicos de primer y segundo orden que pueden ser útiles en la adaptación de la señal de información al campo solar fotovoltaico. Por último, y de igual manera que para los filtros, se realiza un estudio de los moduladores digitales más característicos para poder enviar señales de información en un canal de comunicaciones, en este caso, la línea de potencia como línea de transmisión.

Capítulo 3: Metodología de diseño del modelo para pruebas simuladas y experimentales

En este capítulo se describen las pruebas experimentales realizadas y los resultados obtenidos. Primero se detalla el montaje experimental y en qué consiste. Más adelante se presentan los antecedentes y primeros experimentos realizados, estableciéndose determinadas ciertas suposiciones. A continuación se presentan los experimentos con el esquema completo, con la inclusión de los modelos del inversor fotovoltaico y de la línea de potencia como línea de transmisión y mejoras en la red de adaptación. Para finalizar se realiza la prueba simulada introduciendo un modulador PSK para la transmisión de información.

Capítulo 4: Plataforma de Tratamiento y Visualización de datos

Este capítulo da valor añadido a la tesis, puesto que se ha diseñado una plataforma para el tratamiento de los datos de corriente y tensión del campo solar fotovoltaico y su posterior visualización en tiempo real desde cualquier parte del mundo con acceso a internet mediante una aplicación web y una aplicación móvil.

Capítulo 5: Conclusiones y Consideraciones Generales

Una vez realizadas las pruebas experimentales y obtenidos los datos necesarios para validar los objetivos e hipótesis planteados al comienzo del período de investigación, se extraen una serie de conclusiones y consideraciones generales, tanto a la hora de afrontar el estudio como para su futura aplicación industrial a través de la creación de dispositivos electrónicos.

Capítulo 6: Referencias Bibliográficas

En este capítulo se detalla la bibliografía revisada y utilizada para el desarrollo de la presente tesis doctoral para que pueda servir de consulta a aquellos interesados que quieran profundizar o ampliar alguna de las cuestiones planteadas en el presente trabajo.

CAPÍTULO 1

Antecedentes y Objetivos

1.1 Estado actual de las redes de telecomunicación.

El avance tecnológico y el desarrollo de aplicaciones y dispositivos en tecnologías de la información ha crecido de forma exponencial en las últimas tres décadas en tal medida que los sistemas de información se han vuelto imprescindibles tanto para las sociedades desarrolladas como en vías de desarrollo. Información publicada por la compañía “We Are Social” [1], contrastada con fuentes fiables y varias entidades de peso en el mundo de la tecnología que publican sus propias estadísticas, datan, entre otras cosas, lo siguiente:

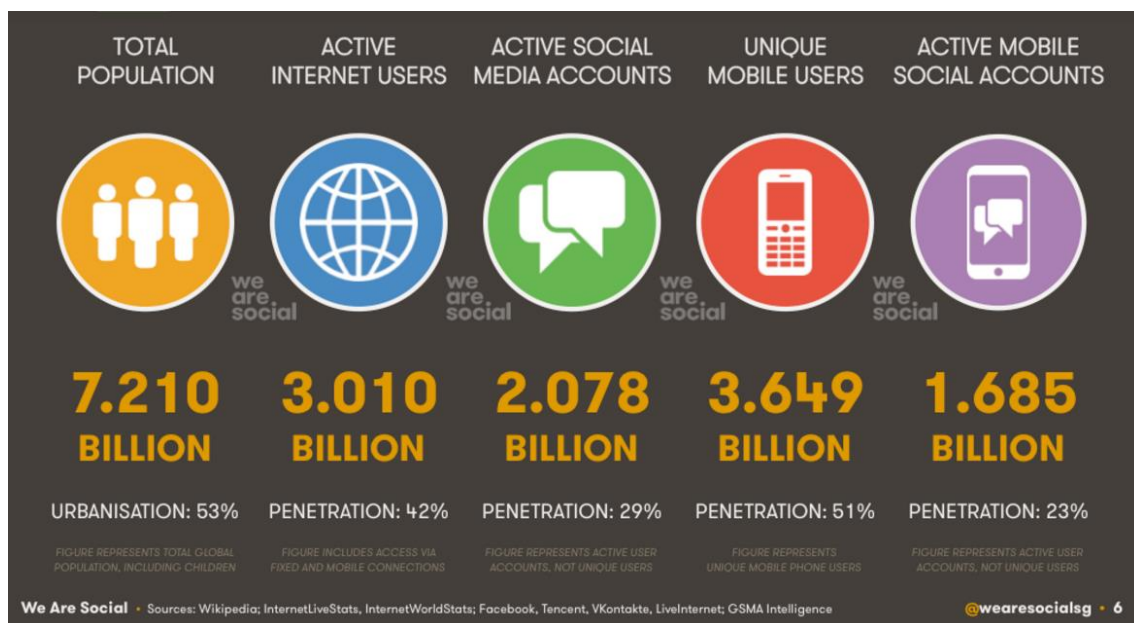


Fig.1: Estadísticas de usuarios internet por “We Are Social”

El 42% de la población mundial son usuarios activos de internet, de los cuales el 21% son usuarios desde el último año. Existen 2.078 billones de cuentas sociales activas, habiendo sufrido un incremento en el último año del 12%. También indican que existen 3.649 billones de usuarios con teléfono móvil los cuales consultan más de 1.685 billones de cuentas, éstas últimas incrementaron el número en un 23% el año anterior. En España, el 44% de su población ha hecho al menos una compra online. Observando las estadísticas diarias particulares de cada medio y en una aplicación creada por Penny Stocks Lab [2] con fuentes de confianza, 500 millones de tweets son enviados, 968

millones de usuarios acceden a su cuenta, de los cuales 844 millones lo hacen vía teléfono móvil, dejando más de 4,5 billones de “likes” y más de 4,5 billones de “posts” lo que supone un total de más de 500.000 GB de datos, lo cual supone que más de 200 millones de dólares son gastados en compras on line a través de Amazon, en torno a los 20 billones de mensajes son enviados en WhatsApp, más de 170.000 horas de vídeo son subidos en YouTube y más de 200 millones de horas son vistos, más de 300 billones de emails son enviados.

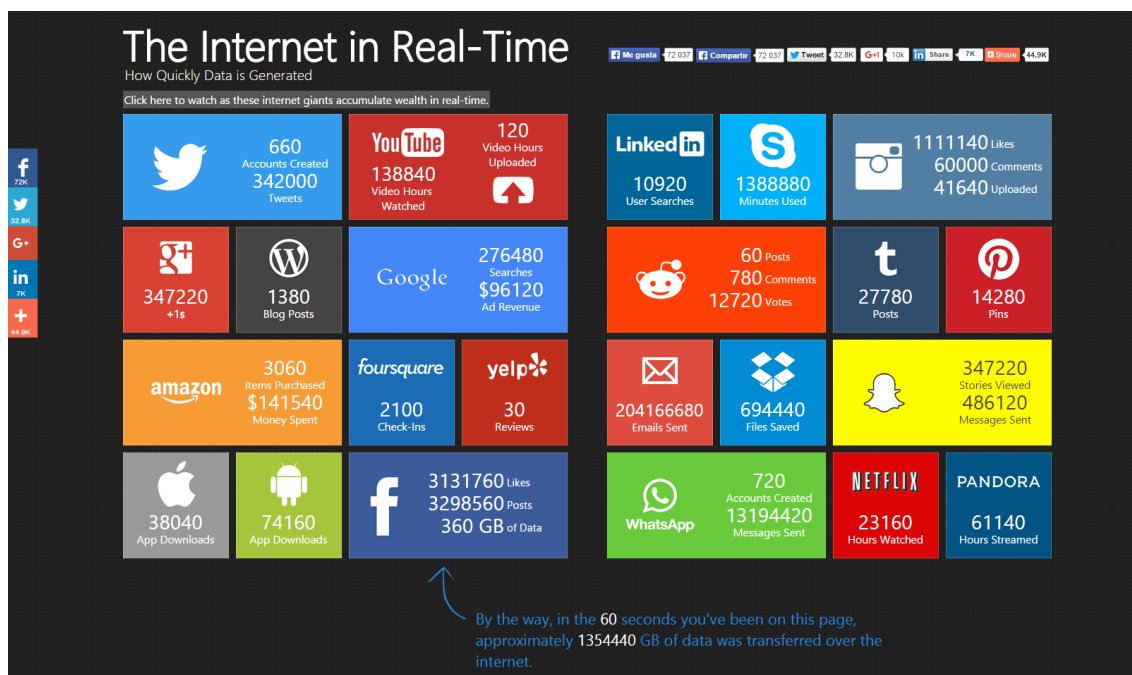


Fig.2: Estadísticas “The internet in Real-Time” a los 60 segundos. Penny Stocks Lab.

El uso de los nuevos dispositivos Smartphone y tablets continúa creciendo exponencialmente y cada vez es mayor el tráfico WEB generado por éstos. Sin ir más lejos, el 31% del tráfico total es generado por Smartphones (experimentó un aumento anual del 39%), el 7% es causado por tablets (aumento anual del 17%) en detrimento del PC que sigue siendo del 62% (disminución anual del 12%). También existe gran cantidad de tráfico generado por videoconsolas 0,1%. Esto hace que cada vez haya más aplicaciones que funcionen en cualquier lugar para observar los procesos a tiempo real de cualquier empresa o proyecto.

Así pues, se puede observar la existencia en la sociedad actual de una demanda creciente de flujo de información, tanto para transmisión en banda

ancha como puede ser la transmisión de voz, vídeo y datos a través de internet, como en banda estrecha, como son por ejemplo las operaciones de control sobre éstas mismas u operaciones de monitorización de sistemas que se encuentran alejadas de una centralita de control.

El desarrollo continuo de las comunicaciones está fuertemente ligado al desarrollo de los sistemas de frecuencia portadora, al ser éstos considerablemente poderosos para la transmisión puesto que, están basados en una mezcla de señales, telefónicas originalmente, moduladas con varias frecuencias portadoras, de tal manera que puedan ser acomodadas una sobre otra en términos de frecuencia. De esta forma, redes que en un principio se desplegaron para dar otro tipo de servicios como son la corriente eléctrica (caso del presente trabajo de investigación), telefonía o televisión por cable, amplían su uso para dar un servicio como redes de telecomunicaciones a través de sistemas guiados para realizar transmisión de datos en banda ancha y estrecha. Este es el principal motivo por el que las redes de telecomunicación no han quedado anticuadas aún en el siglo XXI. El sistema de frecuencia portadora más grande, puede transmitir más de diez mil conversaciones de forma simultánea a través de un par de cables coaxiales.

Las transmisiones en banda ancha llegan a su máximo exponente en velocidad con el descubrimiento en 1977 de la fibra óptica. Éste surge del descubrimiento del rayo láser gracias a los estudios en física dedicados a la óptica, el cual fue aplicado a las telecomunicaciones con el fin de que los mensajes se transmitieran a velocidades inusitadas y con amplia cobertura. Al no existir un conducto o canal adecuado para guiar las ondas electromagnéticas provocadas por la lluvia de fotones originados en la fuente denominada láser, científicos y técnicos especializados en óptica centran todos sus esfuerzos a en la producción de un ducto o canal conocido hoy como fibra óptica.

No obstante, la fabricación e instalación de redes de fibras óptica suponen una elevada inversión debido principalmente a los costes para el despliegue de la red ya que requiere de obras civil, en su gran mayoría, para introducir los cables en conductos bajo tierra.

La tendencia actual de las empresas de telecomunicaciones, es seguir sacando el máximo rendimiento a las redes existentes como redes de comunicación de datos, aunque en un principio dichas redes no fueran desarrolladas con esa intención.

Todo esta revolución en las comunicaciones ha favorecido al extraordinario avance en la mejora de los procesos de cualquier compañía al conllevar un ahorro en tiempo, rendimiento del personal y en costes de diversa índole. Una de estas múltiples ventajas ha sido la de poder monitorizar plantas, sistemas y procesos de ingeniería, como es el caso de cualquier sistema de generación de potencia a través de fuentes de energía renovable. Esta monitorización se puede realizar, no solo sin necesidad de asistir físicamente a la instalación, sino desde cualquier parte del mundo gracias al avance de la gran red.

Para la monitorización de plantas existe una primera etapa de sensores y actuadores en la que la mayoría de las veces no es necesario el requerimiento de un gran ancho de banda para la transmisión de la señal de datos, como ocurre en el caso de una planta solar fotovoltaica. En estas plantas la velocidad a la que se transmite la señal de información no es crítica porque no se requiere de alta velocidad de refresco de los datos de corriente y tensión generados por los módulos solares fotovoltaicos. Lo importante en sí es saber que cada módulo está generando la potencia dentro de unos valores lógicos y obtener el rendimiento del sistema a través de la curva de generación.

1.2 Eficiencia energética. Integración de las comunicaciones en las redes eléctricas, *Smartgrids*.

Las *Smartgrids* son redes eléctricas que se pueden adaptar de manera inteligente al comportamiento y las acciones de todos los usuarios conectados a ella (los generadores, los consumidores y los que hacen las dos cosas) con el fin de entregar de manera eficiente, sostenible, económica y garantizar el suministro de electricidad.

Surge con la necesidad de solucionar los problemas en la red eléctrica actual, de entre los cuales destaca la integración a la red de las Fuentes de Energía Distribuida. Éstas, se pueden definir como sistemas que integran diversas fuentes de energía renovables o no, bajo un único sistema de gestión de la producción y comercialización. Se encuentran conectadas a la red de baja tensión de forma estratégica para producir, almacenar y administrar la energía cerca del lugar de consumo. El nivel de implantación de las mismas es tal que ha cambiado la estructura de la red, por lo que los sistemas de protección quedan anticuados al estar diseñados para trabajar en una estructura vertical, ocasionando un mal funcionamiento del mismo [3].

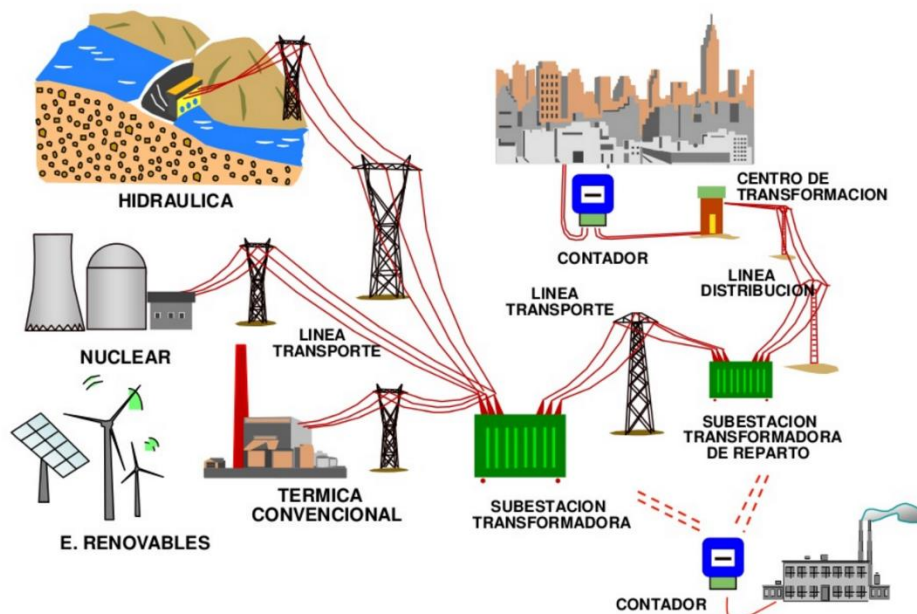


Fig.3: Estructura de la red eléctrica convencional. Fuente: Iberdrola.

Los conceptos de protección existentes tienen que adaptarse y ser ajustados de acuerdo con los cambios en la estructura de la red. La mayoría de los apagones en los últimos años pueden ser considerados como una consecuencia de mantener los protocolos de protección y no ajustarlos adecuadamente a las nuevas condiciones estructurales [4].

Con el fin de realizar una nueva red eléctrica que supla la actual y los problemas descritos anteriormente, se abren numerosas líneas de investigación para dotar a esta nueva red de numerosas aplicaciones. Las comunicaciones en las mismas serán determinantes, puesto que se pretende que el cliente consumidor de energía eléctrica pueda participar de forma activa en la elección del producto a consumir, por ejemplo, desde un cuadro de mando en su casa. También se pretende crear una red sólida de comunicación para operaciones de control y monitorización de la red, además de utilizarla para realizar comunicación entre centralitas, entre otras muchas aplicaciones.

1.2.1 Comunicaciones y objetivos de la Unión Europea sobre la eficiencia energética.

Los máximos organismos de la Unión Europea exponen una serie de planes y objetivos sobre eficiencia energética para reducir el consumo innecesario y los gases de efecto invernadero. Todos estos sirven para ratificar la información expuesta en el apartado anterior y resaltar la importancia de la necesidad de las nuevas redes inteligentes.

En Marzo del 2007, el Consejo Europeo presenta el denominado “objetivo 20-20-20”, según el cual, para el año 2020 el conjunto de los Estados Miembro debe haber alcanzado un:

- 20% de reducción de emisión de gases de efecto invernadero con respecto a las emisiones de 1990.
- 20% de ahorro energético respecto a la evolución esperada con las condiciones actuales (business as usual).
- 20% de presencia de energías renovables en el mix de energía primaria.

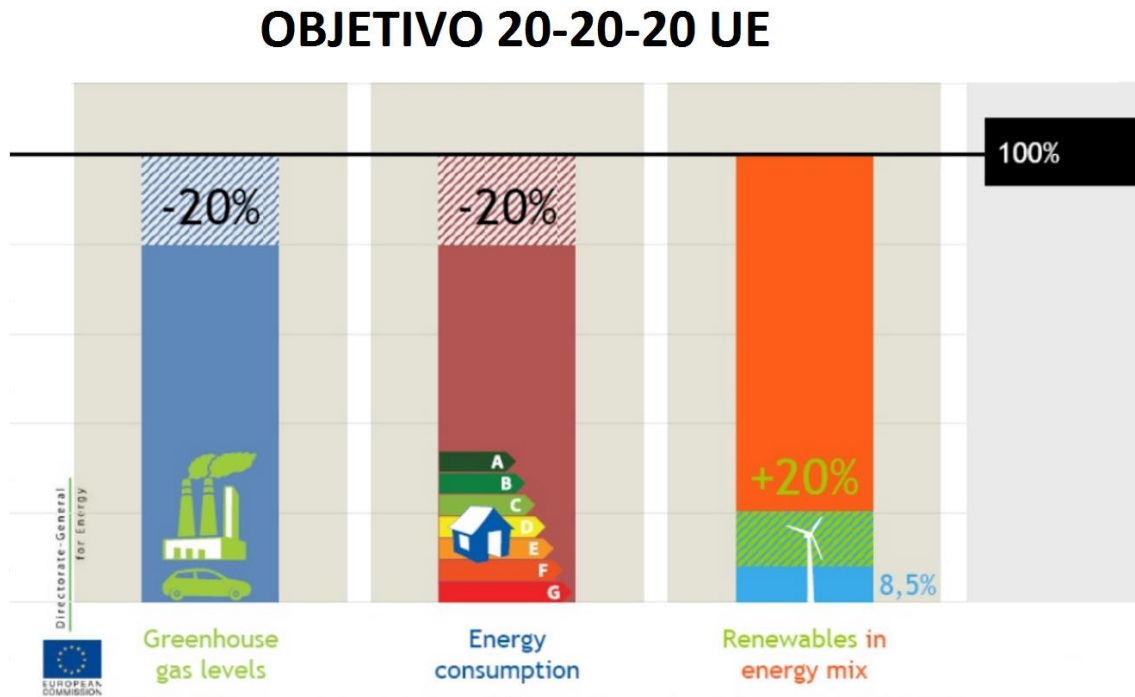


Fig. 4. Objetivo 20-20-20. Fuente: Comisión europea

En julio de 2007, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España establece el Plan de Acción 2008-2012 [5] para adaptarse a la evolución energética del marco nacional e internacional y especialmente a los mandatos en relación a los compromisos expuestos por el Consejo Europeo. En el plan se establecen los nuevos objetivos para el consumo y el ahorro de emisiones. Estos objetivos se basan en los mismos ya existentes en el Plan de 2005-2007 y se coloca un nuevo escenario el cual han nombrado como “adicionales” que representa el esfuerzo para adaptarse con mayor celeridad al marco internacional. Los objetivos sectoriales quedan enmarcados en la siguiente gráfica:

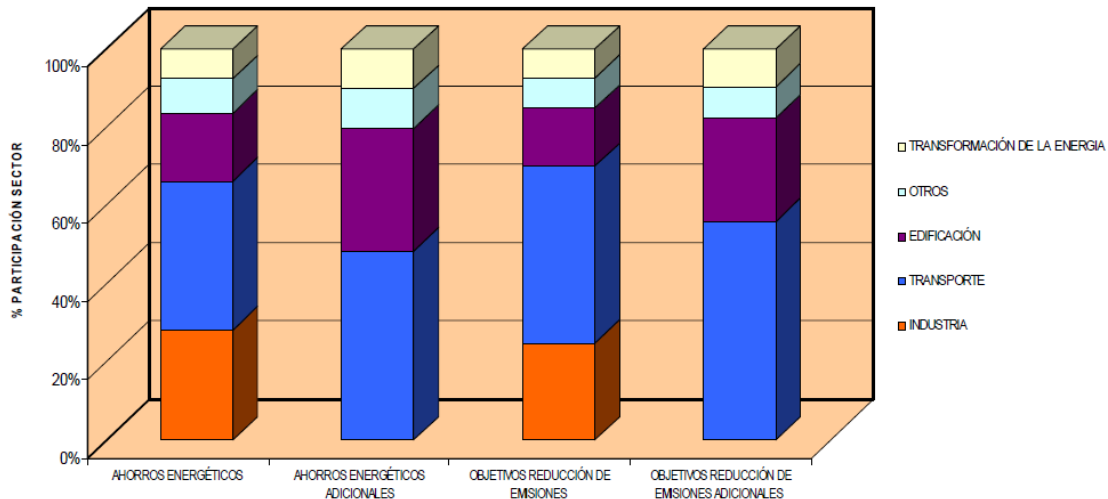


Fig.5: Gráfica objetivos sectoriales en energía y emisiones. Fuente: PAE4+

En la primera y tercera columna aparecen los volúmenes de ahorro energético y reducción de emisiones base que se tenían estipulado en planes anteriores, como ya se ha comentado, y la segunda y cuarta columna el esfuerzo adicional para un incremento de los mismos con el nuevo plan. En la gráfica destaca el sector transporte tanto en ahorros como en emisiones, tanto en volumen total como esfuerzo adicional. Así mismo, destaca el esfuerzo que va a aportar el sector de la edificación, y todo ello, en coherencia con el esfuerzo señalado como mandato medioambiental sobre los sectores difusos.

El Plan también ofrece valores cuantitativos en base al ahorro de consumo expresado en “tep” tonelada equivalente de petróleo y la reducción de emisiones en cantidad total de CO₂ “tCO₂”:

RESULTADOS SECTORIALIZADOS		AHORROS ENERGÉTICOS 2008-2012				EMISIONES EVITADAS 2008-2012	
		TOTALES PAE4+		ADICIONALES A LA E4		TOTALES PAE4+	ADICIONALES A LA E4
		FINAL (ktep)	PRIMARIA (ktep)	FINAL (ktep)	PRIMARIA (ktep)	ktCO ₂	ktCO ₂
SECTORES USOS FINALES	INDUSTRIA	17.364	24.750	-	-	59.165	-
	TRANSPORTE	30.332	33.471	4.373	4.826	107.479	15.495
	EDIFICIOS	7.936	15.283	1.631	3.141	35.540	7.304
	EQUIPAMIENTO DOM. Y OFIMÁTICA	1.729	4.350	314	790	9.288	1.687
	AGRICULTURA	1.402	1.634	45	52	5.112	164
	SERVICIOS PÚBLICOS	691	1.739	69	174	3.712	371
SECTOR TRANSFORMACIÓN	TRANSFORMACIÓN DE LA ENERGÍA		6.707		1.011	17.834	2.688
TOTALES		59.454	87.933	6.432	9.993	238.130	27.709
% ESFUERZO ADICIONAL/TOTAL PAE4 2008-2012				10,8%	11,4%		11,6%

Tabla 1: Objetivos sectoriales energéticos y de reducción de emisiones. Fuente: PAE4+.

La disminución de consumos, totaliza en el periodo la cantidad de 87.933 ktep de energía primaria y de 59.454 ktep de energía final; objetivos que, referidos al consumo de energía del año 2012, significan una reducción del 12,4 % y 13,7 %, respectivamente. El esfuerzo adicional que el presente Plan imprime a los distintos sectores, significa una mejora del 10,8 % en energía final ahorrada, y del 11,4 % en primaria. En relación a emisiones en el periodo se logrará reducir el volumen en 238.130 ktCO₂ con un esfuerzo adicional de las medidas del PAE4+ que logran incrementar los resultados en 27.709 ktCO₂ que significa un esfuerzo adicional del 11,6 %.

El 13 de noviembre de 2008 la Comisión Europea volvió a presentar una comunicación sobre eficiencia energética [6] para analizar los progresos realizados por la Unión Europea e identificar las fuerzas positivas y barreras existentes en la misma estableciendo las siguientes medidas:

- Se amplió la legislación existente sobre eficiencia energética en los edificios para incluir más instalaciones. La Comisión consideraba que es viable ahorrar un 30 % más de energía en el sector.
- La legislación sobre el etiquetado por la que se exige información del consumo de energía de los productos se aplicó no solo a aparatos domésticos, sino también a productos de tipo comercial e industrial

consumidores de energía y relacionados con la energía, tales como las ventanas y los motores utilizados en los edificios.

- Se presentó una nueva legislación sobre el etiquetado energético para fomentar el uso de neumáticos que favorezcan el consumo eficiente de combustible. Dichos neumáticos, que no requieren tanta fuerza para girar el volante, consumen menos combustible.
- Además, se reforzarían las medidas vigentes sobre la generación combinada de electricidad y calor (cogeneración).

Para que los usuarios tengan una mayor información, como cita la comunicación anterior, los usuarios requerirán nuevos equipos instalados en sus hogares. Para poder dar esta información la comunicación en las líneas de potencia de la red eléctrica será el factor clave como se mencionó con anterioridad y se explica a continuación en la integración de las comunicaciones en las SmartGrids.

En 2011 la Unión Europea propuso un Plan de Acción para la Eficiencia Energética [7] para garantizar el objetivo de ahorro del 20% y contribuir al establecimiento de una economía con bajas emisiones de carbono y eficiente en el uso de los recursos. Para ello define los siguientes puntos clave:

- Es muy importante que se consuma poca energía en el sector de la construcción, ya que este es responsable de casi el 40 % del consumo final de energía. El presente documento pone de relieve las maneras de mejorar la eficiencia energética en este sector, como la formación de arquitectos e ingenieros a través de la Agenda de nuevas cualificaciones y empleos y permitiendo que las empresas de servicios energéticos (ESE) den dinero a las administraciones públicas para reducir el consumo de energía.
- Con respecto a la industria, este documento recomienda el uso de nuevos equipos e infraestructuras que cumplan con la Directiva del régimen de comercio de derechos de emisión y la Directiva relativa a emisiones industriales.

- El citado documento propone reforzar la Directiva sobre diseño ecológico y definir medidas estrictas para aparatos domésticos como calentadores de agua u ordenadores. Mientras tanto, ayudar a los consumidores a comprender en qué consiste la etiqueta ecológica debería contribuir a fomentar los productos eficientes desde el punto de vista energético.
- Este documento menciona los instrumentos financieros, como el programa Energía inteligente - Europa y el Programa Energético Europeo para la Recuperación como maneras para financiar la eficiencia energética. Sin embargo, en virtud de la Directiva sobre eficiencia energética, en la que se basó el presente documento, la financiación de la eficiencia energética ha de proceder de regímenes de financiación como el Horizonte 2020, el Fondo Europeo de Eficiencia Energética y los Fondos Estructurales y de Inversión Europeos.

En 2012, la UE adoptó una nueva Directiva sobre eficiencia energética por la que se establecieron las normas para un suministro y uso más eficientes y se fijaron objetivos orientativos nacionales para fomentar la eficiencia energética.

Cabe destacar que el Plan Nacional de acción de eficiencia energética 2014-2020 [8] aporta datos sobre el consumo de energía final entre los años 2007 y 2012.

Sectores	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Industria	27.541	25.909	21.238	21.528	21.325	20.765
Transporte	42.089	40.318	37.719	37.025	35.890	33.229
Usos Diversos	28.358	28.283	28.664	30.455	29.272	29.007
Residencial	15.628	15.498	15.928	16.924	15.617	15.466
Servicios	8.822	9.300	9.409	9.801	10.234	10.068
Agricultura	2.947	2.699	2.363	2.244	2.404	2.397
Otros no especificados	962	786	965	1.487	1.017	1.076
TOTAL	97.988	94.511	87.621	89.008	86.505	82.991

Tabla 2: Estructura Sectorial del consumo de energía final 2007-2014 Fuente: MINETUR/IDAE

La tabla pone de manifiesto que la reducci3n global del 4% se debi3 principalmente, a la ca3da de la demanda para el transporte (7,4%) y en menor cuant3a a la asociada al sector industria.

Por 3ltimo, a trav3s del Instituto para la Diversificaci3n y ahorro de la energ3a es posible consultar los indicadores energ3ticos tanto finales como primarios hasta el a3o 2013 para Espa3a y 2012 para alguno de los pa3ses de la UE y el promedio en la UE.

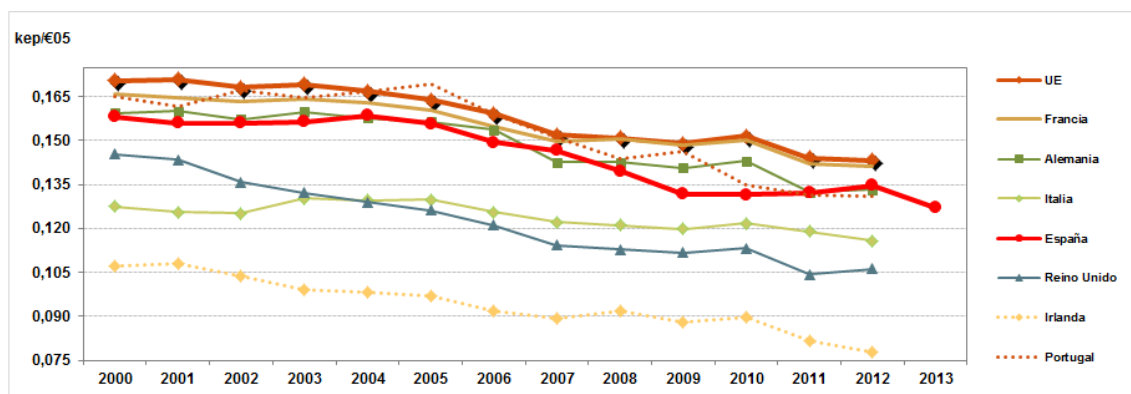


Fig. 6: Evoluci3n de la intensidad energética primaria. Fuente IEA

Se puede apreciar c3mo en la curva correspondiente a Espa3a la intensidad energética primaria dejaba de descender entre los a3os 2009 a 2012 llegando a estabilizarse con el plan anterior que acababa en 2012 y con el nuevo plan se consigue que vuelva a decrecer en 2013.

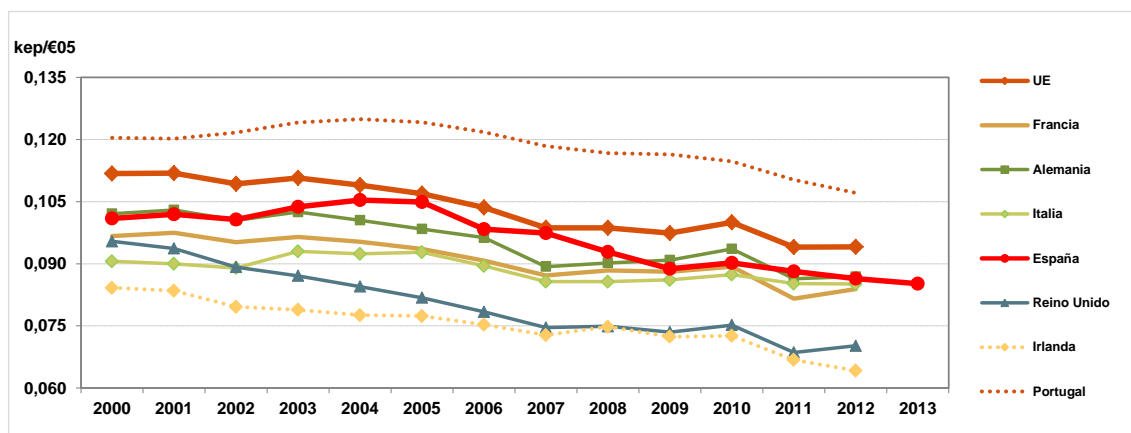


Fig. 7: Evoluci3n de la intensidad energética final. Fuente IDAE

La evolución de las energías finales sí que parece que sigue una dinámica decreciente lineal en estos últimos años.

En definitiva, toda esta creciente preocupación en el ámbito de las emisiones de gases de efecto invernadero junto con la revolución en las comunicaciones, resaltan la importancia de realizar este trabajo de investigación, al quedar enmarcado dentro de un proyecto de total relevancia en el futuro próximo de la sociedad. Prueba de ello es el numeroso grupo de compañías, entre ellas las compañías de electricidad más importantes de los principales países de la Unión Europea, que se encuentran trabajando en el proyecto para la implantación de estas nuevas redes eléctricas inteligentes en sustitución de la red actual.

1.2.2 SmartGrids, evolución y objetivos.

Durante la Primera Conferencia sobre la Integración de Fuentes de Energía Renovable y Distribuida mantenida en Diciembre del 2004, las partes interesadas de la industria y la comunidad de investigación sugirieron la creación de una Plataforma Tecnológica Europea para el tratamiento de algunos de los principales retos económicos, tecnológicos o sociales con los que Europa se enfrenta, entre los que se encuentran las redes de electricidad del futuro.

Así, la Comisión General de Investigación Europea desarrolla en conjunto con otros grupos investigadores una guía con los principios de la “European Technology Platform” (ETP) [9] para crear Agendas comunes de investigación con los principales participantes en un sector en concreto para una visión común y enfoque para el desarrollo de la tecnología concerniente. Comienza a trabajar en 2005. Las partes interesadas en estas plataformas tecnológicas son típicamente:

- Industria: grande, mediana y pequeña de cada sector.
- Autoridades públicas: en su papel fundamental para establecer marcos legales y organismos de financiación así como promotores y consumidores de tecnología.

- Institutos de investigaci3n y comunidad acad3mica
- Comunidades financieras: bancos privados, fondo europeo de inversiones, capital de riesgo, banco europeo de reconstrucci3n y desarrollo, etc.
- Sociedad civil, incluyendo usuarios y consumidores

De esta forma nace la Plataforma Tecnol3gica Europea de Redes Inteligentes o SmartGrids ("European SmartGrids Technology Platform) y en abril de 2006, la Comisi3n Europea publica el primer documento del mismo [10] con la Visi3n y Estrategia para las redes de electricidad europeas del futuro. 3ste recoge puntos principales como la liberaci3n del mercado, el cambio de la generaci3n en las tecnolog3as para cumplir con los objetivos ambientales y el uso futuro de la electricidad. Las nuevas formas de generaci3n deben tener las siguientes caracter3sticas:



Fig. 8: Caracter3sticas nueva red de electricidad

Anteriormente se coment3 que el nivel de implantaci3n de las fuentes de energ3a distribuidas hab3a cambiado la estructura de la red, por lo que los conceptos de protecci3n existentes tienen que adaptarse y ser ajustados de acuerdo con estos cambios. As3 pues, en el futuro, el funcionamiento del sistema ser3 compartido entre generadores centrales y distribuidos y el control de estos

últimos podría agregarse para formar micro redes o centrales eléctricas “virtuales” para facilitar su integración tanto en el sistema físico como en el mercado.

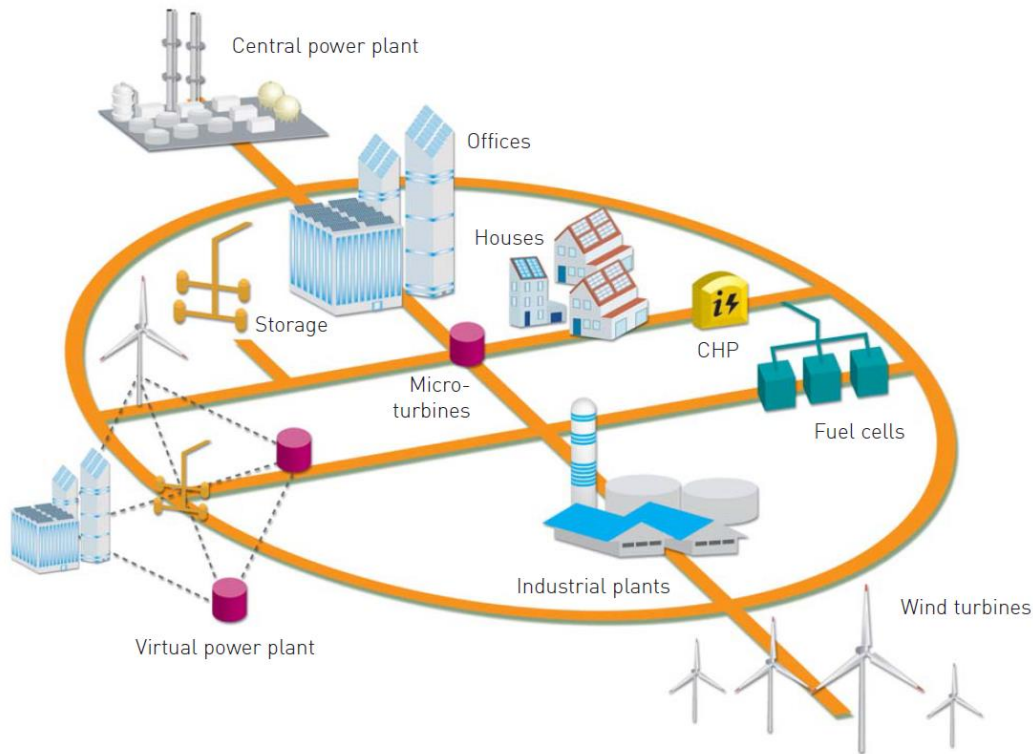


Fig.9: Estructura de las SmartGrids

Por ello, una parte de la electricidad generada por grandes centrales será desplazada por la generación distribuida -entre ellas las renovables, y habrá una gestión por parte de la demanda, respuesta de la demanda y almacenamiento de la energía. Para ello, será necesario instalar capacidades de reserva para asistir en los casos en los que las intermitentes fuentes de energía renovable dejen de generar potencia.

En cuanto a la comunicación se requieren modelos como los de internet, con redes de distribución activas para hacer eficiente el enlace entre la fuente de energía y la demanda del consumidor para permitir a ambos decidir a tiempo real cuál es la que más le conviene. Con todo esto el control de las plantas será mucho mayor y se podrá evaluar el flujo de potencia, control de la tensión y la protección. Para ello se requerirá de nuevas tecnologías competentes en coste, así como nuevos sistemas de comunicación con más sensores y más

actuadores. Todo esto conlleva a un crecimiento enorme en el tráfico de información.

El documento de Visión y estrategia [10] detalla la evolución hacia una red de distribución activa resumido en la siguiente figura:

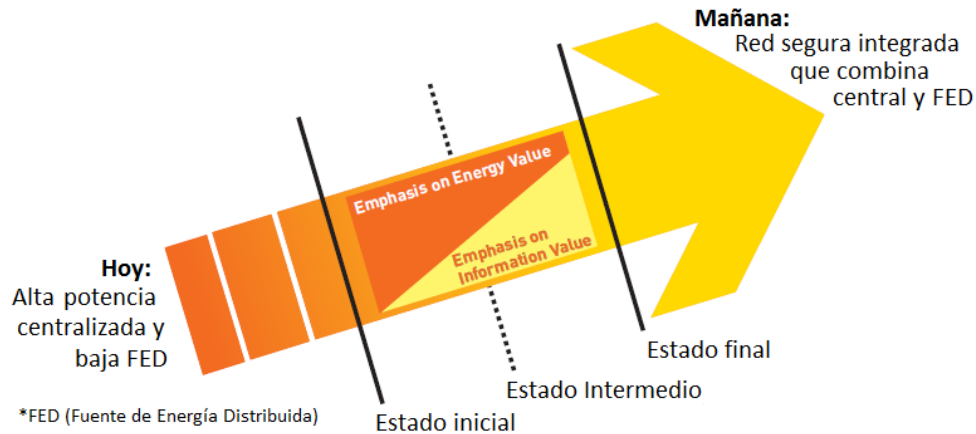


Fig.10: Evolución hacia una red de distribución activa

1. Estado inicial: Aumento de la monitorización y control remoto de FED (Fuentes de energía Distribuidas) y FER (Fuentes de Energía Renovables) para facilitar la actividad de la conexión. Se necesitan nuevos contratos bilaterales y reglas para delimitar los límites físicos y geográficos de contratación.
2. Estado intermedio: Será necesario definir un nuevo régimen de gestión capaz de albergar grandes cantidades de FER y FED con servicios locales y globales sin sobrecarga de información ni problemas de control.
3. Estado final: Gestión activa de energía completa, las redes de distribución y transmisión son ambas activas con funciones de control armonizados interactuando a tiempo real y flujos de energía eficientes.

En 2007 se publica la “Agenda Estratégica de Investigación para las Redes Europeas de Electricidad del futuro” [11] (de ahora en adelante SRA) a través de la Comisión Europea y la ETP (European Technology Platform) de SmartGrids. En ella se describen las principales áreas, divididas en subáreas,

t3cnicas o no t3cnicas, a ser investigadas a medio y corto plazo en Europa para las SmartGrids y son:

- RA1 (Research Area 1): Infraestructura de distribuci3n Inteligente. Dise1o de redes teniendo en cuenta peque1os clientes.
- RA2: Operaci3n inteligente, flujo de energ3a y adaptaci3n a clientes.
- RA3: Redes de distribuci3n activas y gesti3n activa. Nuevas herramientas y arquitecturas para la transmisi3n y distribuci3n en cortas y largas distancias.
- RA4: Interoperabilidad entre las redes inteligentes europeas
- RA5: Temas y catalizadores para las SmartGrids.

En cuanto a las intenciones y objetivos sobre las redes de informaci3n y comunicaciones futuras afirma que a fin de realizar los conceptos relacionados con la integraci3n de clientes, gesti3n de la demanda efectiva y redes activas, es una necesidad fundamental estudiar, desarrollar e implementar el intercambio de datos de informaci3n econ3mica, eficiente y confiable. Las arquitecturas actuales de comunicaci3n han evolucionado para servir al control, orden y monitorizaci3n centralizado, no obstante, en el futuro es necesario dotar a las arquitecturas distribuidas de una mayor flexibilidad para los flujos de informaci3n. La velocidad de entrega de datos depender3 de la necesidad real, con mayor o menor ancho de banda de datos dependiendo de la operaci3n. Las infraestructuras actualmente instaladas tendr3n que evolucionar hacia soluciones m3s flexibles de comunicaci3n debido al potencial alto coste de sustituci3n. Las soluciones propuestas de comunicaci3n deben ser escalables (adecuadas a las necesidades de peque1as utilidades desde el centro de control para medir los hogares, a los servicios p3blicos y grandes usuarios industriales) as3 como seguras, proporcionando redundancia y propiedades de auto sanaci3n.

En 2008 se crea el primer borrador del SDD (Strategic Deployment Document) [12] el cual es publicado en 2010, basado en contribuciones y discusiones de muchas entidades y personas miembros de la Uni3n Europea. 3ste, describe con mayor detalle las prioridades para el desarrollo de innovaci3n

en las redes de electricidad y los beneficios que dichas innovaciones darán a las partes interesadas.



Fig.11: Partes interesadas en la creación de SmartGrids

El documento enumera una serie de desafíos clave para las nuevas redes:

- Fortalecimiento de la red eléctrica: Asegurar que hay suficiente capacidad de transmisión para interconectar recursos energéticos, especialmente renovables en toda Europa.
- Conexión Offshore: desarrollo de las más eficientes conexiones con parques eólicos fuera de tierra y otras tecnologías marinas.
- Desarrollo de arquitecturas descentralizadas que permitan a pequeños sistemas generadores de electricidad operar de forma armoniosa con el sistema total.
- Comunicaciones: para entregar la información que permita a millones de partes operar y comercializar en el mercado.
- Dinamizar a los consumidores: Permitir a todos los consumidores, con o sin su propia generación, jugar un papel importante en la operación del sistema.

- Integrar la dimensi3n intermitente, como se explic3 con anterioridad para poder suplir los espacios de tiempo de no generaci3n.
- Mejorar la generaci3n, demanda y red inteligente.
- Captura de los beneficios de los generadores y de los responsables del almacenamiento.
- Posibilitar la penetraci3n del veh3culo el3ctrico dado el posible desarrollo masivo de 3stos en los siguientes a3os. Es necesario pensar que estos veh3culos requieren de puntos de carga que sustituir3n a las estaciones actuales de gas. Estos puntos pueden colocarse de forma estrat3gica para el almacenamiento de energ3a.

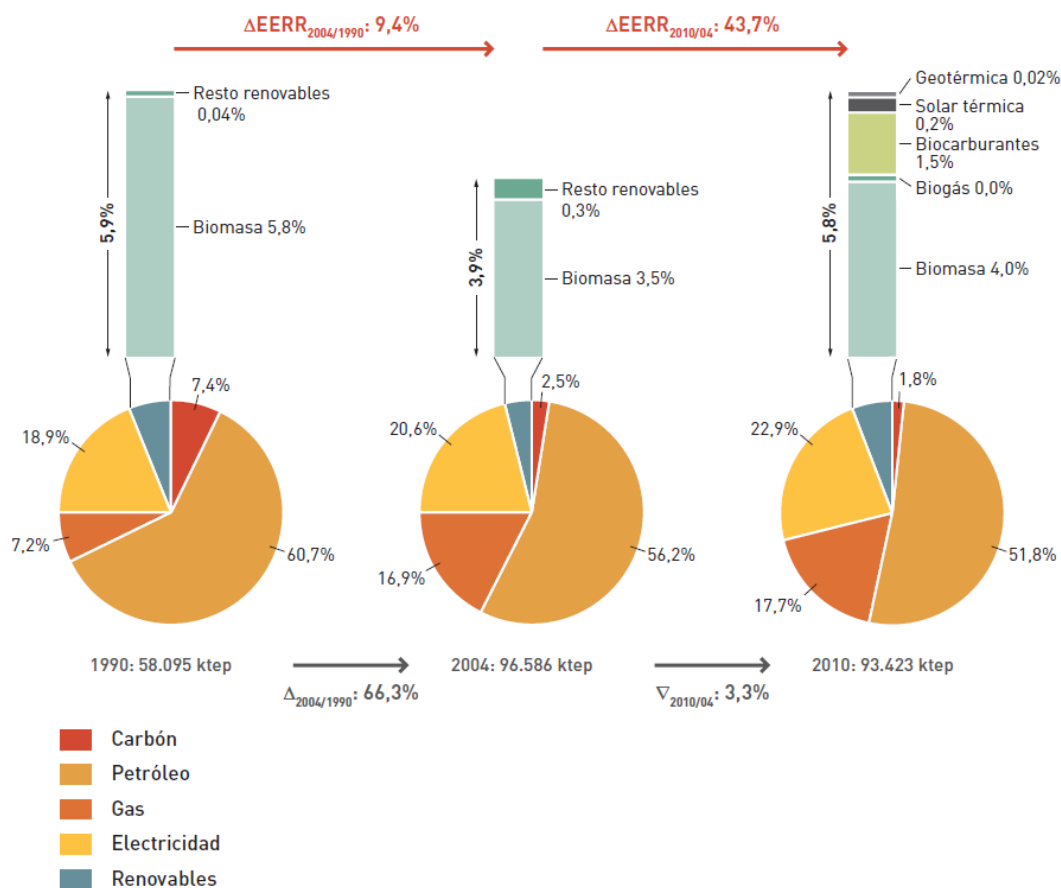
Se crea recientemente el SmartGrids ETP Forum que sustituye al anterior Consejo Asesor de la ETP (Advisory Council). 3ste est3 compuesto por un grupo de 12 representantes de varios grupos de las partes interesadas: Gestores de red de transporte, fabricantes de sistemas el3ctricos, generadores de energ3a, etc.

En Estados Unidos existe otro organismo, el EPRI (Electric Power Research Institute), que se encuentra tambi3n trabajando en las l3neas de potencia inteligentes mediante la iniciativa IntelliGrid de EPRI.

En conclusi3n, las comunicaciones juegan el papel m3s cr3tico y por tanto fundamental en las nuevas redes inteligentes y una de las posibilidades dentro de ellas es el uso de las mismas l3neas de potencia. As3 lo destaca Liu Wenking en su art3culo publicado en Diciembre del 2011 [13] donde puntualiza que los sistemas PLC para banda estrecha con rangos de frecuencias menores a los 500KHz juegan un papel importante en el desarrollo de las nuevas redes inteligentes (SmartGrids).

1.3 Fuentes de energía distribuida. Energías Renovables.

Como se mencionó en apartados anteriores, el Consejo Europeo promulgó una serie de objetivos y planes para el año 2020, lo cual conlleva un crecimiento exponencial en la instalación de fuentes de energía distribuida de las cuales, gran parte de estas, son de origen renovables, es decir, de la obtención de energía a través de elementos primarios como el sol, el aire, el agua o la biomasa. Este crecimiento es posible observarlo en los datos ofrecidos por el 2º Plan Nacional de Ahorro y Eficiencia Energética [14]:



Fuente: MITYC/IDAE

Fig.12: Evolución de la estructura de consumo de energía final por fuentes energéticas

En los datos ofrecidos se observa que el incremento de consumo en Energías renovables entre el año 1990 y el 2004 fue del 66,3%. Entre el año 2004 y 2010 el incremento fue de un 3,3%.

El Plan Nacional de Ahorro y Eficiencia Energética 2014-2020 [8] aporta una gráfica muy explícita de la evolución del consumo con nuevos datos de hasta el 2012.

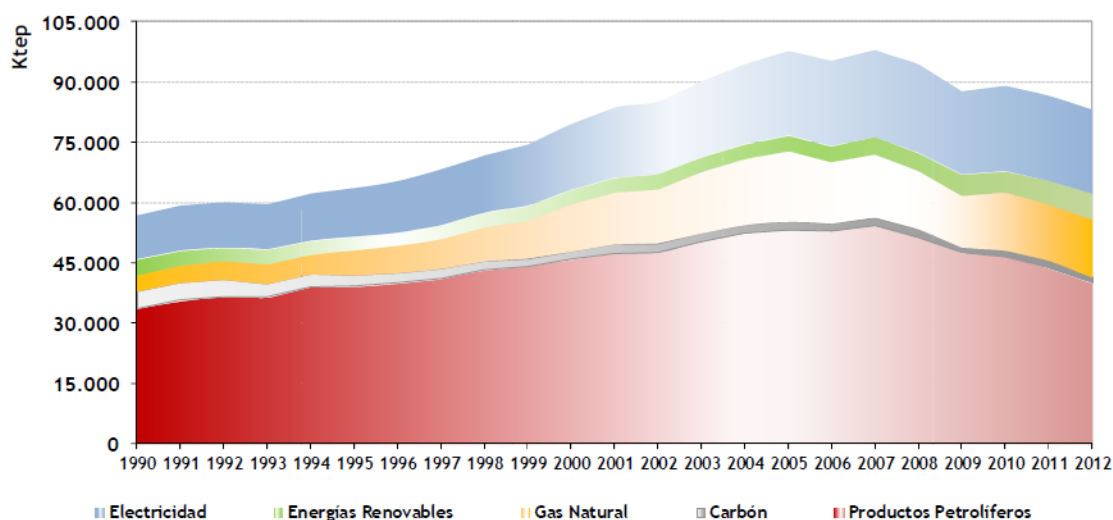


Fig.13: Evolución de la estructura de consumo de energía final por fuentes energéticas.

Fuente: IDAE

En la gráfica se observa directamente cumplido uno de los objetivos en cuanto a eficiencia energética como es la reducción del consumo de energía y el aumento progresivo del mismo de energías renovables en color verde. Así quedó dividido el consumo de energía en las principales fuentes en el año 2012:

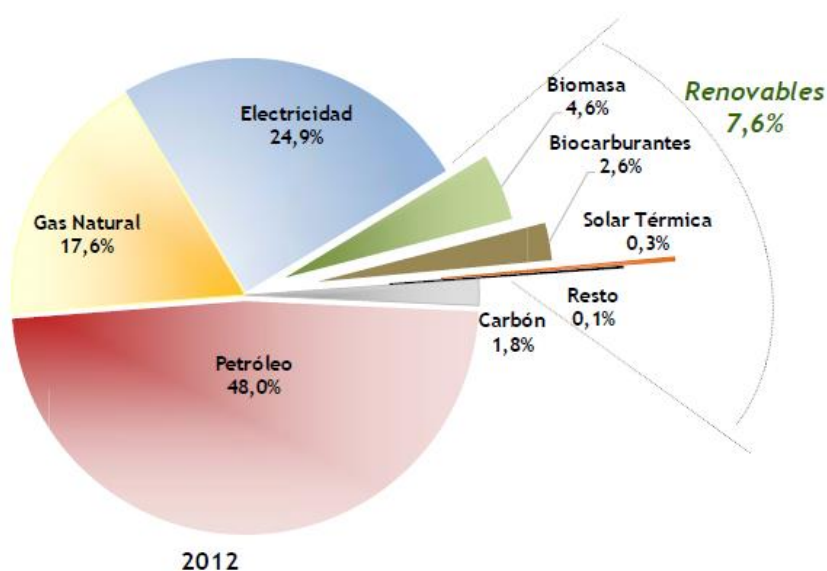


Fig.14: Estructura de consumo de energía final por fuentes energéticas

Para mostrar una idea m3s detallada, el plan ofrece tambi3n valores cuantitativos sobre el consumo de energ3a primaria para estos a3os de las distintas fuentes, entre ellas, las de origen renovable:

	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Carb3n	20.037	13.504	9.663	7.248	12.698	15.510
Productos Petroliferos	71.739	68.834	63.792	61.334	58.567	54.154
Gas	31.778	34.903	31.219	31.123	28.930	28.184
Nuclear	14.360	15.369	13.750	16.155	15.042	16.019
Energ3as Renovables	10.007	10.552	12.465	14.944	14.728	16.004
<i>Biomasa</i>	4.231	4.206	4.606	4.561	4.845	4.964
<i>Biog3s</i>	217	207	194	277	275	291
<i>RSU</i>	309	328	319	174	195	176
<i>Hidr3ulica</i>	2.349	2.009	2.271	3.638	2.631	1.767
<i>E3lica</i>	2.371	2.833	3.278	3.807	3.691	4.255
<i>Solar Fotovoltaica</i>	43	220	513	553	640	705
<i>Solar Termoel3ctrica</i>	2	4	42	299	508	1.482
<i>Solar T3rmica B.T.</i>	93	125	155	183	205	220
<i>Geotermia</i>	9	11	14	16	17	18
<i>Biocarburantes</i>	384	609	1073	1436	1721	2127
Saldo (Imp-Exp)	-495	-949	-697	-717	-524	-963
TOTAL	147.426	142.213	130.193	130.088	129.441	128.909
Usos no energ3ticos	7.984	7.690	7.150	7.034	6.772	5.980
TOTAL usos energ3ticos	139.442	134.523	123.043	123.054	122.669	122.928

Tabla. 3: Estructura de consumo de energ3a primaria por fuentes (ktep) 2007-2012. Fuente: MINETUR/IDAE

La estructura de generaci3n el3ctrica con fuentes de energ3a renovables represent3 el 29,2% de la generaci3n el3ctrica bruta en 2012. Este a3o dicha producci3n (66.417GWh), sin tener en cuenta la hidr3ulica, super3 la de origen nuclear (61.140GWh). En la siguiente tabla se representa la producci3n de electricidad seg3n fuentes:

Fuentes	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Carbón	74.085	49.973	36.938	26.323	45.126	55.991
Productos Petrolíferos	18.508	18.002	19.242	16.562	14.692	15.321
Gas Natural	94.799	120.798	107.746	94.851	85.508	73.308
Nuclear	55.103	58.973	52.761	61.990	57.718	61.470
Energías Renovables	58.284	62.143	74.080	97.776	87.523	86.962
Hidráulica	27.309	23.364	26.411	42.304	30.596	20.545
Resto de Renovables	30.975	38.779	47.669	55.472	56.927	66.417
Bombeo	3.213	2.780	2.751	3.207	2.315	3.617
Otros	1.061	1.089	1.102	818	966	890
TOTAL	305.053	313.758	294.620	301.527	293.848	297.559

Tabla. 4: Estructura de la generación eléctrica según fuentes (GWh) 2007-2012.

Fuente: MINETUR/IDAE

1.3.1 Implantación de Energías Renovables

Como se ha podido comprobar la tendencia es la de sustituir el modelo energético actual donde las fuentes de energía de origen fósil ocupan la mayor de las fuentes: petróleo, gas natural, carbón y energía nuclear. Es de considerar que, además de reducir los gases de efecto invernadero, esta fuente es agotable por lo que tarde o temprano debe ser reemplazada.

Así pues, las energías renovables es una de las opciones más importantes para dicho reemplazo atendiendo a que la energía primaria procede de fuentes de energía a priori inagotables, como por ejemplo el sol, el cual se estima pueda persistir 4500 millones de años hasta su agotamiento.

Por supuesto es necesario destacar que para dicha implantación se requiere de una inversión importante por parte de los distintos estados o gobiernos de naciones y entidades internacionales. Mientras se tenga en cuenta la energía procedente de origen fósil como fuente principal puede parecer que dicha inversión es muy difícil de solventar, sin embargo, debería hacerse un estudio detallado de las inversiones que representa la adquisición y conservación de petróleo, gas, plantas nucleares. Por tanto, la clave está en un cambio de planteamiento y no de inversión.

Dentro de la instalación de sistemas de energías renovables, como sistemas solares fotovoltaicos o eólicos, se diferencian dos tipos de instalaciones:

- Sistemas autónomos: para satisfacer la necesidad energética del emplazamiento en el que son situados
- Sistemas conectados a red: inyectan la señal generada de potencia a la red de transporte de electricidad.

Los sistemas de cogeneración han aumentado considerablemente debido a la disminución en los costes de los dispositivos de electrónica de potencia presentes en los mismos. Éstos, hacen que el sistema tenga una vida media superior a los sistemas autónomos que contienen elementos críticos como baterías para el almacenamiento de la energía, las cuales disponen de una vida media inferior a la década. No obstante, Jiménez Castañeda [15] sostiene que el futuro de la energía solar pasa por el establecimiento de la estrategia del autoabastecimiento, pues al ser una fuente energética descentralizada, parece lógico pensar que la forma más adecuada de gestión debe ser también descentralizada. Para ello habría que abandonar el modelo actual de alta concentración en grandes plantas productoras de energía y redes extensas de reparto.

1.3.2 Energía Solar Fotovoltaica. Desarrollo actual

Un sistema solar fotovoltaico es aquél capaz de transformar la energía procedente del sol en una señal de potencia. La aparición de esta forma de sustento tiene su origen en el descubrimiento del efecto fotovoltaico por el francés Alexandro Edmond Becquerel en 1838 y más adelante por el efecto fotovoltaico en sólidos por el ingeniero eléctrico inglés Willoughby Smith en 1873. La primera célula fotovoltaica fue de selenio y data de 1877, creada por el inglés William Grylls Adams profesor de Filosofía Natural en la King College de Londres, junto con su alumno Richard Evans Day aunque la cantidad de energía que se conseguía era reducida. No hubo aplicación hasta la invención de la primera célula fotovoltaica de Silicio, la cual aumentaba considerablemente la

eficiencia de las anteriores, por parte de Gerald Pearson de Bell Laboratories en 1953. Daryl Chaplin y Calvin Fuller, de la misma entidad, perfeccionaron este invento y produjeron células solares de silicio capaces de proporcionar suficiente energía eléctrica como para que pudiesen obtener aplicaciones prácticas de ellas.

El precio de estos sistemas es alto y no es hasta mediados de los años 70 y principios de los 80 del siglo pasado cuando comienzan a aparecer programas para la promoción de los mismos centrados en grandes plantas centralizadas a gran escala.

Así, a principios de los 80 la empresa Alpha Real puso en marcha el proyecto Megawatt [16] el cual nació para demostrar el valor de instalar pequeñas plantas en tejados frente a las grandes plantas de generación alejadas. EL proyecto anunciaba a través de los medios de comunicación la búsqueda de propietarios de inmuebles con el único requisito de tener un tejado expuesto al sol. La respuesta fue extraordinaria y finalmente se consiguió instalar plantas de 3kW en más de 333 techos de viviendas privadas en Zurich alcanzando una potencia instalada superior a 1 MW.

La potencia instalada de energía solar fotovoltaica en Europa cubre de media el 3,5% de la demanda de electricidad alcanzando el 7% en los períodos de mayor producción según la International Energy Agency [17]. Esta agencia es la encargada de un programa de cooperación energética en más de 28 miembros, entre los que está España, y con la participación de la Comisión Europea denominado PVPS (Photovoltaic Power Systems Programme). El programa nació en 1993 con la misión de mejorar los esfuerzos internacionales de colaboración que faciliten el papel de la energía solar fotovoltaica como una piedra angular en la transición hacia sistemas energéticos sostenibles. Para ello, producen Documentos con información de las principales fuentes confiables de la industria y cuerpos oficiales de gobierno como el “Snapshot of Global PV Markets” que muestra información acerca de los distintos mercados PV desarrollados según países el último año.

A finales del año 2014, se detalla la cifra de 177 GW instalados en todo el mundo lo que representa el 1% de la generación de electricidad total.

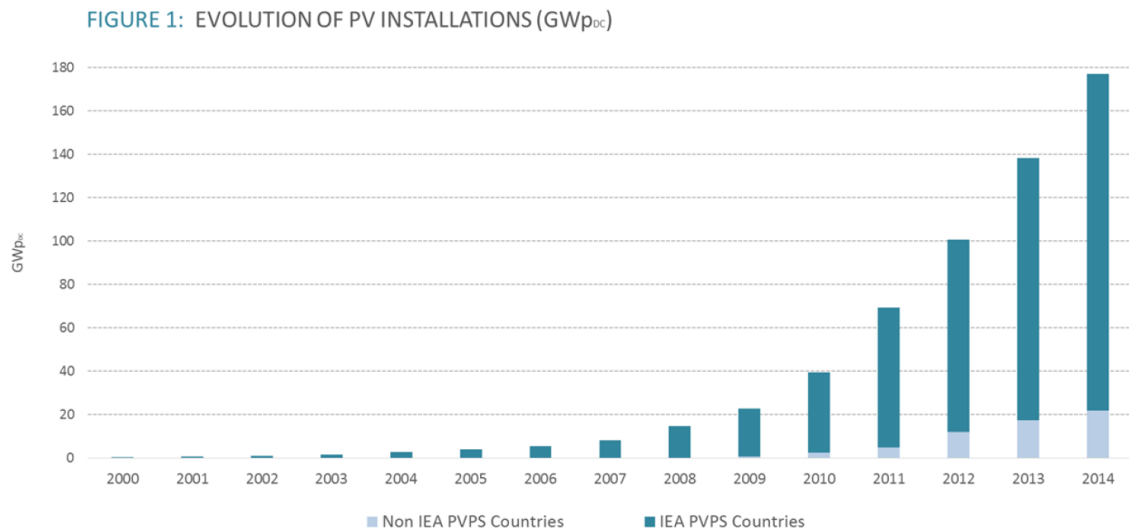


Fig. 15: Evolución de instalaciones PV totales

En la gráfica aparecen divididas las instalaciones en miembros participantes en el programa y en no participantes. Los países participantes son: Australia, Austria, Belgium, Canada, China, Denmark, France, Germany, Israel, Italy, Japan, Korea, Malaysia, Mexico, the Netherlands, Norway, Portugal, Spain, Sweden, Switzerland, Thailand, Turkey, and the United States of America.

En el siguiente gráfico se observa que ya son 19 los países los que cubren al menos el 1% de su demanda anual de electricidad con plantas fotovoltaicas.

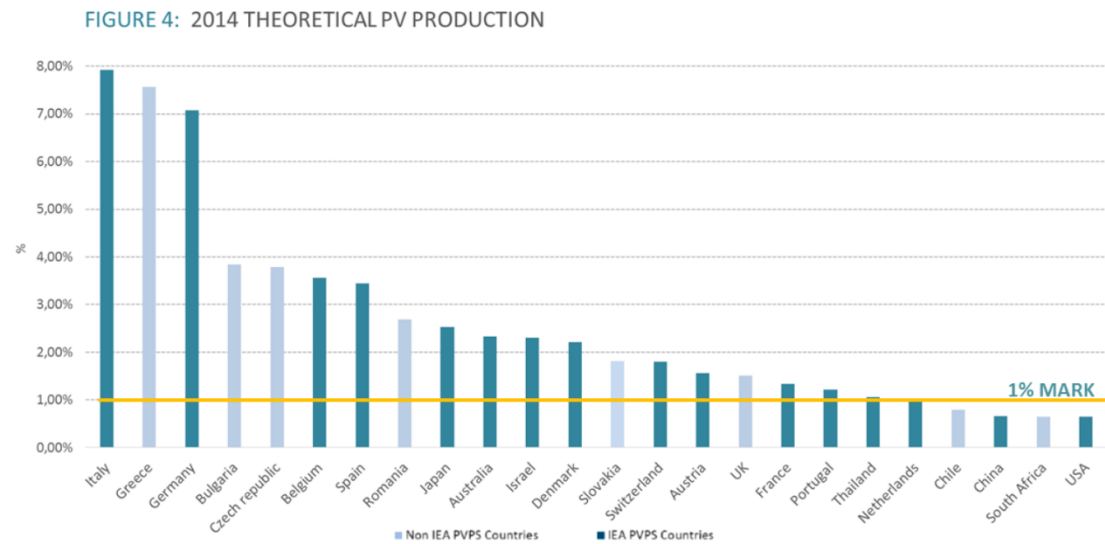


Fig. 16: Energ3a producida con respecto a la demanda anual de cada pa3s.

En Espa3a, la situaci3n es similar a la de otros mercados europeos y el modelo se encuentra en un estado de transici3n. En 2008 fue el pa3s con mayor potencia fotovoltaica instalada en el mundo debido a la combinaci3n de los 3ptimos recursos energ3ticos renovables y al nivel tecnol3gico excelente en energ3as renovables junto con una legislaci3n que habr3a necesitado un ajuste muy preciso para ser mucho m3s beneficiosa. El Real Decreto 661/2007 fue publicado para la regulaci3n de la producci3n de energ3a y estableci3 una tarifa de inyecci3n a red (TIR) del orden de 0,40€/kWh, dependiendo de la potencia nominal de la instalaci3n, como se muestra en la siguiente tabla:

Grupo	Subgrupo	Potencia	Plazo	Tarifa regulada c€/kWh	Prima de referencia c€/kWh	L3mite Superior c€/kWh	L3mite Inferior c€/kWh
b.1	b.1.1	P≤100 kW	primeros 25 a3os	44,0381			
			a partir de entonces	35,2305			
		100 kW<P≤10 MW	primeros 25 a3os	41,7500			
			a partir de entonces	33,4000			
		10<P≤50 MW	primeros 25 a3os	22,9764			
			a partir de entonces	18,3811			
	b.1.2		primeros 25 a3os	26,9375	25,4000	34,3976	25,4038
			a partir de entonces	21,5498	20,3200		

Tabla. 5: Tabla con las tarifas de energ3a solar en R.D. 661/2007

Las condiciones, como se observa en la tabla, fueron muy favorables para instalar este tipo de sistemas y era una garant3a a largo plazo. Este decreto se

aprob3 en Septiembre de 2007 con per3odo de validez de un a3o y el ritmo de instalaci3n fue creciendo hasta alcanzar la cifra de 500MW/mes de modo que en Septiembre de 2008 la potencia instalada acumulada fue de 3116 MW.

En 2008 se estableci3 el nuevo Real Decreto 1578/2008, en el cual se redujeron las tarifas de inyecci3n a red y se impuso una limitaci3n de la potencia instalada.

Denominaci3n		Descripci3n	Potencia m3nima / m3xima (kW)	Tarifa (c€/kWh)
Tipo I	Subtipo I.1	Instalaciones ubicadas en fachadas o sobre cubiertas (*)	0 / 20 kW	34
	Subtipo I.2		21 / 2.000 kW	32
Tipo II		Resto de instalaciones	0 / 10.000 kW	32

Tabla. 6: Tarifas R.D. 1578/2008

Se distinguen dos tipos de instalaciones por primera vez, los situados en fachada y cubierta de los situados en suelo. Las primeras de hasta 20 kW y la segunda de 21 kW hasta 2000 kW. Adem3s el nuevo decreto impon3a un registro de pre-asignaci3n que abr3a en cuatro convocatorias al a3o con tediosos pasos burocr3ticos. Esto ha provocado una disminuci3n paulatina hasta llegar a ser casi nula, como se puede comprobar con los datos oficiales, donde a finales del 2008 la potencia total instalada fue de 3354MW y a finales del 2014 la cifra registrada es de 4672 MW, por lo que en los 3ltimos 6 a3os el incremento ha sido en torno a los 1300 MW.

Volviendo al Informe del programa IEA PVPS, cabe destacar el siguiente gr3fico de la evoluci3n anual de potencia fotovoltaica instalada:

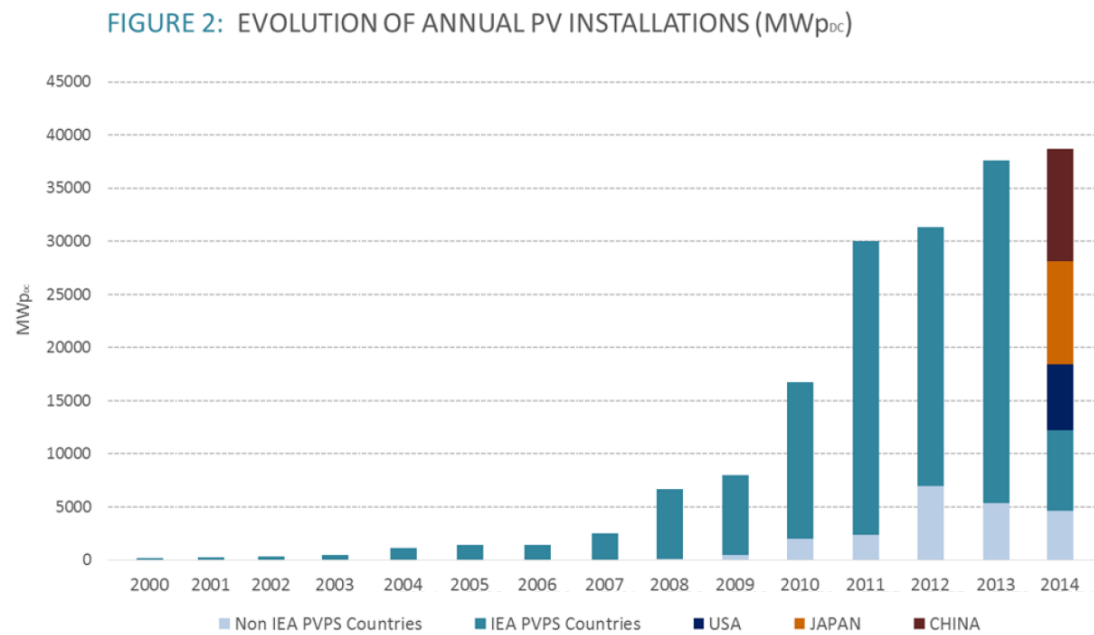


Fig. 16: Evoluci3n anual de instalaciones PV en los principales mercados.

La cifra de potencia instalada en el mundo en 2014 fue de 38,7 GW. En el citado informe se destaca el establecimiento del mercado PV chino con m3s de 10GW instalados como primera potencia y el r3pido crecimiento del mercado Japon3s que produjo m3s de 9,7 GW confirmando a Asia como la primera regi3n en mayor n3mero de instalaciones PV en el a3o. En la siguiente tabla se puede observar los diez pa3ses que m3s potencia instalaron en 2014 frente a los que poseen m3s potencia acumulada instalada.

		TOP 10 COUNTRIES IN 2014 FOR ANNUAL INSTALLED CAPACITY			TOP 10 COUNTRIES IN 2014 FOR CUMULATIVE INSTALLED CAPACITY		
1 st		China	10,6 GW			Germany	38,2 GW
2 nd		Japan	9,7 GW			China	28,1 GW
3 rd		USA	6,2 GW			Japan	23,3 GW
4 th		UK	2,3 GW			Italy	18,5 GW
5 th		Germany	1,9 GW			USA	18,3 GW
6 th		France	0,9 GW			France	5,7 GW
7 th		Australia	0,9 GW			Spain	5,4 GW
8 th		Korea	0,9 GW			UK	5,1 GW
9 th		South Africa	0,8 GW			Australia	4,1 GW
10 th		India	0,6 GW			Belgium	3,1 GW

NUMBERS HAVE BEEN ROUNDED

Source: IEA PVPS

Fig.17: Top 10 de pa3ses con m3s potencia instalada en 2014 y total

Otros mercados han confirmado su maduración, como Australia, Corea, Tailandia o Taiwán y se está abriendo en países como Malasia y Filipinas. Es de destacar asimismo a India, la cual con una buena política de ayuda, mantiene el ritmo de instalación.

En Europa el mercado de instalación de energía solar fotovoltaica continúa en disminución, a pesar del crecimiento del mercado en el Reino Unido que se establece en el primer lugar en 2014 con 2,27 GW instalados. Otros que experimentan un cierto crecimiento es Francia (1GW) y Holanda y Suiza siguen en progreso. Alemania baja su producción pero sigue produciendo una cantidad considerable (1,9GW), al igual que Italia (400MW). España, como se comentó anteriormente, junto con otros países donde el mercado estaba establecido como República Checa, Bélgica, Grecia y Bulgaria, ha casi desaparecido la inversión en instalaciones de energía fotovoltaica.

En África, Sudáfrica es la única con un mercado establecido con 1GW de PV instalada. El resto de países africanos han anunciado proyectos pero no pasan de ser eso, solo proyectos.

En Norteamérica, el mercado estadounidense continúa creciendo y alcanzó los 6,2 GW instalados en 2014. Canadá (500MW) y México (64MW) siguen creciendo. En Sudamérica, Chile destaca con sus 400MW instalados.

Con todos estos datos se puede decir que el futuro de la energía solar fotovoltaica está asegurado. Además, la variedad de películas de silicio de los que están compuestos los módulos fotovoltaicos es cada vez mayor, fabricándose cada vez las películas más delgadas y con mucho menor coste.

1.4 Power Line Communication. Estado del arte.

1.4.1 Breve Introducción.

El término en comunicaciones Power Line Communications (PLC), comunicaciones a través de las líneas de potencia, engloba a todas aquellas técnicas utilizadas para transmitir datos a través de líneas de potencia, ya sean en líneas de corriente alterna como de continua.

Dichas técnicas poseen una gran ventaja: es posible la transmisión de señales sin necesidad de instalar una nueva red de telecomunicación, usando como medio de transmisión la red convencional de electricidad, ahorrando con ello los costes de instalación que corresponden al mayor porcentaje de los costes de un proyecto de este tipo. Además, la red eléctrica es la que posee mayor despliegue a nivel mundial, dando cobertura a más del 90% de la población mundial, por lo que es una clara alternativa a la deficiente cobertura de infraestructuras de telecomunicaciones en zonas rurales alejadas de las grandes urbes, zonas a las que los sistemas de redes de telefonía no dan cobertura y no pueden ser suplidos por sistemas de transmisión vía radio al tener un coste mayor.

Para estudiar y efectuar transmisiones de señales en zonas urbanas se han creado grupos de trabajo y foros, como el PLC Forum, el cual apoya y fomenta el desarrollo y normalización de PLC's. A continuación citamos algunos de los grupos más importantes:

- PLC Forum
- Universal Powerline Association (UPA).
- PLC Utilities Alliance (PUA).
- HomePlug Alliance

Según Henry Bastidas Moras en sus estudios [18], existen aplicaciones de Banda estrecha que emplean frecuencias del orden de los kHz para usos de

monitorización y control, pero también se pueden alcanzar tasas de transmisión de varios Mbps con frecuencias en el rango de 1.6 a 30MHz

Este mismo autor sostiene en otra publicación suya [19], que la ubicuidad de la red de baja tensión ofrece un gran potencial que permitirá mediante la tecnología PLC lograr servicios de telecomunicaciones (voz, datos, video, Internet, telefonía IP, servicios de información, entre otros) en sitios urbanos y rurales.

Así pues, se puede dividir el empleo de la tecnología PLC en dos grandes áreas; 1) transmisión en banda estrecha, orientada más a operaciones de control de la red eléctrica y monitorización de Fuentes de Energía Distribuida entre otras muchas aplicaciones y 2) comunicación entre estaciones y transmisión en banda ancha, servicio ethernet con transmisión de voz, vídeo y datos.

La transmisión en banda estrecha se realiza tanto en las redes convencionales de corriente alterna como en líneas de potencia de corriente continua. Para el desarrollo de la presente tesis doctoral se han estudiado en detalle diversos artículos sobre el acoplo y desacoplo en líneas de potencia tanto de corriente continua y alterna en diversas aplicaciones [20], [21], [22]. El uso de líneas de corriente continua para transmisión de datos se utiliza por ejemplo en robótica y sistemas vehiculares [22] para la comunicación entre los sensores actuadores de un robot o la comunicación dentro de los vehículos. También en naves espaciales [21], para la comunicación dentro de la misma y obtención de datos característicos así como de las interferencias en la comunicación por ruido térmico de todos los dispositivos electrónicos presentes en la nave. Todas estas investigaciones surgen por la necesidad de abaratar costes, ya que se usa una línea de transmisión ya instalada en las distintas aplicaciones sustituyendo a la anterior solución de poner un medio dedicado exclusivamente para tal fin, que además de subir los costes puede llegar a constituir un verdadero caos como sería el cablear decenas de líneas dentro de un mismo robot o una línea dedicada para cada cadena de módulos fotovoltaicos conectada al inversor.

En conclusión, el estudio de la viabilidad de la transmisión de datos a través de las líneas de potencia de corriente continua en un campo solar fotovoltaico es de gran importancia, puesto que actualmente las vías para monitorización y obtención de parámetros fundamentales del sistema requieren del uso de tecnología inalámbrica o de un medio delicado, como pueden ser el par trenzado o el cable coaxial, encareciendo considerablemente los costes del sistema. Para ello será importante estudiar la influencia de la variación I-V típica de un generador fotovoltaico sobre la comunicación de datos, al ser éste un caso especial de líneas de potencia en corriente continua. Este estudio será abordado en la presente tesis doctoral más adelante.

1.4.2 Antecedentes.

Ya a principios del siglo XX se empezaron a utilizar las líneas de potencia como medio de transmisión de datos en aplicaciones de banda estrecha mediante sistemas de frecuencia portadora en el rango de hasta varios kHz para mediciones y tareas de control de las compañías eléctricas. Más adelante comienzan a utilizarlo para envío de información de uso interno entre las centralitas de las distintas compañías.

No obstante no es hasta 1997 cuando en ciertos países se retoma el interés por la transmisión de datos sobre la red eléctrica y presentan en el mercado una tecnología capaz de conseguir que Internet fuera accesible a través de dicha red, naciendo así diversas tecnologías de PLC comercial.

Con la liberalización de los mercados de energía y telecomunicaciones en 1998 se empieza a utilizar la tecnología para las comunicaciones en banda ancha. Se dan grandes avances en los campos de modulación, codificación y detección, lo que permite que se use la red de baja tensión para dar servicio de internet como alternativa a los servicios de ADSL, cable o acceso inalámbrico. El principal inconveniente y en el que se centra la mayoría de grupos de investigación, es la fuerte presencia de ruido en las mismas, lo que limita de forma considerable la longitud a través de la cual es posible realizar la comunicación.

En el año 2000 se funda el *HomePlug Powerline Alliance* que es una asociación de fabricantes electrónicos, proveedores de servicios y minoristas que establecen estándares y efectúan pruebas de los dispositivos de las diversas tecnologías de PLC conocidas como *HomePlug*.

El 13 de febrero de 2004 la FCC (Comisión Federal de Comunicaciones), órgano regulador de telecomunicaciones en los Estados Unidos, realizó un anuncio oficial en el que manifestaba su apoyo al despliegue de la tecnología necesaria para mantener comunicaciones PLC. El 14 de Octubre de ese mismo año, este mismo organismo propone las directrices para facilitar el despliegue de la tecnología para entregar servicios en banda ancha a casas y negocios.

Por su parte, el 6 de Abril de 2005, la Comisión de las Comunidades Europeas publica en el Diario Oficial de la Unión Europea [23] una recomendación de la Comisión sobre comunicaciones electrónicas en banda ancha en redes eléctricas. En ésta recuerda a las autoridades nacionales que tienen como objetivo promover la competencia en el suministro de redes de comunicaciones electrónicas, que incluyan las redes de comunicaciones a través de la red eléctrica. Por consiguiente, deberían suprimir todos los obstáculos reglamentarios injustificados, en particular los que afectan a las empresas de servicio público, que dificulten el despliegue y explotación de redes de comunicaciones electrónicas a través de sus redes eléctricas. También anima a todas las partes implicadas a unir esfuerzos para que dicha tecnología se convierta en una alternativa real a las tecnologías ya existentes.

El 18 de Agosto de 2005 la HomePlug Powerline Alliance publica [24] las especificaciones de la nueva tecnología para las comunicaciones PLC, el HomePlug AV (HPAV), el cual nace con el objetivo de realizar un servicio de alta calidad, *multi-stream* (tipo de transmisión con flujo de datos constante) y de entretenimiento orientado a casas a través de las líneas de AC. Sugiere que con dicha tecnología se alcancen tasa de datos sobre los 200 Mbps con un rendimiento real de unos 100Mbps. HPAV aspira a ser la red elegida para transmisión de datos *multi-stream* incluyendo HDTV (TV in high Definition),

SDTV (*TV Digital System*) y archivos de audio de alta calidad con la mejor calidad y servicio.

A partir de aquí se han comercializado productos con distintos nombres o versiones posteriores de los mismos productos con mejoras continuas sobre el nivel de señal de ruido de las comunicaciones y con velocidades mayores de transmisión.

1.4.3 Parámetros característicos de una línea de potencia.

Cabe destacar que una línea de energía eléctrica tiene cuatro parámetros que afectan a su capacidad para cumplir su función como parte de un sistema de potencia: resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia [19]. Estos mismos parámetros son de suma importancia para la determinación de las propiedades del canal PLC usado para transportar señales de telecomunicaciones. La línea de potencia de un campo solar fotovoltaico transporta corriente continua de los módulos fotovoltaicos hacia el inversor cc/ca (corriente continua/corriente alterna), por lo que la capacitancia e inductancia no afectan a la señal de potencia; no obstante, la señal inyectada de información es de alterna por lo que éstos aumentan su valor considerablemente con el aumento de la frecuencia de la señal.

Además de los parámetros primarios ya mencionados, son de gran importancia otros dos parámetros de la línea de transmisión: su impedancia característica Z y la constante de propagación Y . Estos parámetros no son de uso frecuente en líneas de transmisión de potencia eléctrica pero son de mayor importancia para consideraciones de su uso en las comunicaciones, puesto que a las frecuencias a las que se trabaja, es necesario aplicar teoría de microondas.

Mediante el estudio de los diversos parámetros se puede obtener las características de propagación de la línea. Dichos parámetros pueden ser obtenidos mediante las ecuaciones que rigen el modelo de línea característica de una línea de potencia. En el segundo capítulo de la presente tesis se aborda el tema con más detalle.

1.4.4 Estado actual y soluciones adoptadas

Hasta ahora, las líneas de investigación estaban centradas sobre todo en dos aplicaciones fundamentales. Una de ellas era integrarla dentro de una red de área extensa como red de acceso de última milla, proporcionando internet a través de la red eléctrica. Ésta sería una clara alternativa a las redes de acceso tradicionales. En España ya hay varias empresas dedicadas a esto, como por ejemplo *Tecnocom* o *Defense Support Services LLC* (DS2), las cuales estimaban que para el 2014 el 25% de las redes de acceso sería mediante PLC. La otra aplicación fundamental en la que más se ha investigado hasta ahora, es la de utilizar la tecnología como red de área local (LAN, *Local Area Network*), supliendo de esta forma a la red *Wi-Fi*, con la ventaja de llegar a zonas a las que quizás ésta no alcanza.

Sin embargo, cada vez es mayor el número de investigaciones y desarrollos orientados a las líneas de potencia de corriente continua como por ejemplo en el uso del cableado eléctrico en los vehículos para transmitir señales de comunicación. Ana Belén Vallejo Mora sostiene [25] que los coches de hoy en día están equipados con multitud de sistemas electrónicos (inyección, climatizadores, alumbrado automático, etc.), que cuentan con sensores y actuadores que necesitan comunicarse entre sí y con un sistema de control central. Para ello, existen protocolos basados en estándares internacionales, como CAN (*Controller Area Network*), LIN (*Local Interconnect Network*) y FlexRay que utilizan buses dedicados. La tecnología PLC supone por tanto un ahorro considerable al permitir utilizar los mismos cables de alimentación para transmitir datos, facilitando además la incorporación de nuevas funcionalidades. Relaciona la tecnología PLC aplicada a vehículos con el de uso LAN en interiores puesto que considera que la red de cableado eléctrico en ambos casos tienen una topología arborescente y se centra en aplicar la metodología ya existente en LAN's al vehículo.

Para analizar el canal de comunicaciones la autora se apoya en el modelo invariante en el tiempo (LTI) realizadas en el vehículo, el cual queda

caracterizado por su respuesta al impulso $h(t)$ o, lo que es equivale, por su respuesta en frecuencia o función de transferencia $H(f)$ (Fig. 1).

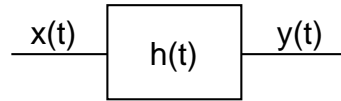


Fig.18: Respuesta al impulso

La respuesta al impulso $h(t)$ se corresponde con la transformada inversa de Fourier de la función de transferencia del canal $H(f)$, y determina la relación entrada-salida del sistema causal, dada por

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau$$

Ec.1 La salida del sistema es la convolución de la entrada por su respuesta al impulso

Este modelo de canal es válido para representar el comportamiento de la red de alimentación del v h culo para cierto estado de sus dispositivos. Cuando alguno de ellos es activado o desactivado, el canal experimenta una variación, siendo por tanto diferente la función de transferencia $H(f)$ que describe la nueva configuración. Por esta razón, realiza diversas pruebas con estos variantes sobre el canal que de este modo pasa a ser un canal variante en el tiempo de forma periódica. Para hallar la función de transferencia se centra en la ecuación en base a los parámetros S:

$$H(f) = \frac{S_{21}(f)}{1 + S_{11}(f)}$$

Ec.2 Función de transferencia con parámetros S

donde S_{11} es el parámetro de reflexión y S_{21} el parámetro de transmisión. Estos parámetros los mide con ayuda de un analizador de redes vectorial sobre diferentes canales de un v h culo Fiat Coupé. Cada canal medido es el resultado de evaluar el enlace seleccionado en el v h culo junto con el efecto de dos cables BNC que se han incorporado en los puertos transmisor y receptor del analizador, así como los conectores insertados en sus extremos.

Wenqing Liu, va algo más allá que la anterior autora en su estudio del canal para transmisión en banda estrecha con PLC en aplicaciones de *SmartGrids* [13]. Indica que un canal de línea de potencia puede ser descrito por su escenario de ruido, impedancia de acceso, varianza en el tiempo, además de su función de transferencia, describiendo el procedimiento para obtener cada uno de ellos.

Estas investigaciones han sido abordadas también en áreas como el aeroespacial, el ferroviario, el naval y el aeronáutico. Flavia Grassi realiza un estudio [21] sobre la caracterización del canal y la evaluación electromagnética de los buses de potencia de corriente continua diferencial en naves aeroespaciales. Esta autora sostiene que la transmisión de datos a través de líneas de corriente alterna con PLC se encuentra muy desarrollada, no así en líneas de potencia de continua en donde la línea se ve afectada por altos valores de ruido. En su trabajo argumenta que el mayor problema de las comunicaciones sobre líneas de potencia de DC diferencial es la compatibilidad electromagnética (EMC) y que las dos mayores cuestiones a verificar son que: 1) Las perturbaciones electromagnéticas (EM) generadas por el equipo electrónico de potencia a bordo de una nave espacial no pone en peligro la confiabilidad e integración de la comunicación, y 2) La radiación de las líneas de potencia no causan interferencia o ruido en otros dispositivos electrónicos. Para resolver dichos problemas, propone el modelo de línea de transmisión de un cable de par trenzado como el que se encuentra típicamente en una nave y realiza el estudio teórico para resolver la función de transferencia del canal, así como la señal de ruido y las impedancias características del mismo.

1.5 Objetivos del trabajo de investigaci3n

1.5.1 Objetivo General

El objetivo principal de la presente tesis doctoral es estudiar la viabilidad de transmitir informaci3n a trav3s de las l3neas de potencia de corriente continua de una instalaci3n fotovoltaica.

1.5.2 Objetivos Particulares

Para alcanzar el objetivo general es necesario el cumplimiento de los siguientes objetivos particulares;

- i. Identificar los problemas fundamentales para la inyecci3n de una se1al de informaci3n sobre una l3nea de corriente continua.
- ii. Modelar te3ricamente el problema de la comunicaci3n a trav3s del esquema el3ctrico equivalente.
- iii. Simular experimentalmente el m3todo para transmisi3n de informaci3n sobre una l3nea de corriente continua fotovoltaica.

1.6 Hip3tesis planteadas

Para alcanzar dichos objetivos se hace necesario formular las siguientes hip3tesis:

- i. El uso de equipos comerciales para transmisi3n de datos mediante tecnolog3a PLC en l3neas convencionales, es posible para las l3neas de corriente continua de un campo solar fotovoltaico.
- ii. El efecto de la variaci3n de las magnitudes el3ctricas I-V, t3picas de un generador fotovoltaico, no es cr3tico para la fiabilidad de las comunicaciones PLC.

1.7 Plan de trabajo

El plan de trabajo dise1ado para ello ha conestado de las siguientes etapas:

- i. Revisi3n del estado del arte de la tecnolog3a PLC para uso en l3neas de corriente continua.
- ii. Definici3n del modelo el3ctrico de la comunicaci3n PLC en l3neas de corriente continua.
- iii. Montaje del sistema experimental en una planta fotovoltaica real de conexi3n a red. Ensayos preliminares
- iv. Experimentaci3n mediante simulaci3n software del modelo de comunicaci3n PLC definido.
- v. Formulaci3n de las conclusiones y nuevas l3neas de investigaci3n.

CAPÍTULO 2

Caracterización del Sistema Objeto de Estudio

2.1 Sistema Solar Fotovoltaico

Existen dos tipos de sistemas posibles, atendiendo a la fuente de almacenamiento de la energía: los sistemas solares fotovoltaicos con inyección de la señal generada de potencia en la red convencional de electricidad y los sistemas solares fotovoltaicos autónomos. El primero de ellos requiere de un dispositivo encargado de realizar la conversión de corriente continua (como es la señal de potencia generada por los módulos fotovoltaicos) a corriente alterna (como es la señal que transporta la red convencional de electricidad). A este dispositivo se le conoce con el nombre de inversor. Para el segundo sistema se utilizan baterías para el almacenamiento de la energía y tienen como principal ventaja el poder ser instalada en zonas donde no llega la red eléctrica, aunque también presenta una serie de desventajas como la reducción del tiempo de vida medio del sistema puesto que la durabilidad de las baterías se convierte en el punto más crítico, siendo inferior a la decena de años.

En el presente trabajo de tesis se van a considerar para su estudio los sistemas solares fotovoltaicos con conexión a red. Para poder comprender con mayor claridad el funcionamiento del mismo, se va a proceder a explicar cada uno de los componentes de los que está compuesto y sus características. El esquema general de este sistema es el que se muestra en la figura 19.

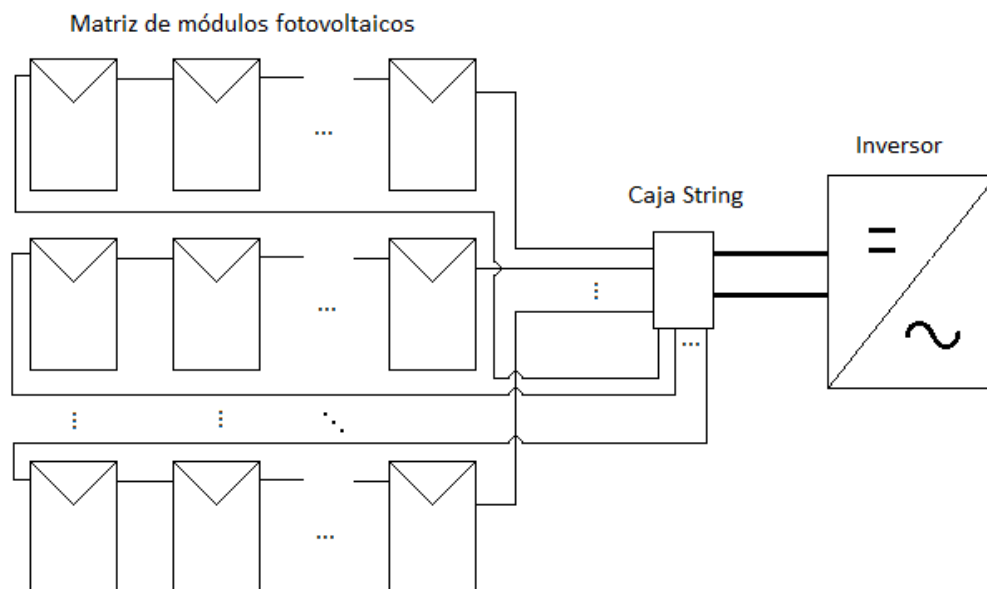


Fig.19 Sistema solar fotovoltaico con conexión a red.

En la figura se observa por una parte la matriz de módulos fotovoltaicos en su configuración de conexión en serie de módulos, la cual consiste en conectar grupos de módulos primero en serie e interconectados en paralelo en su terminación mediante una caja String. Los módulos fotovoltaicos son el componente esencial del generador fotovoltaico. Si la instalación es muy grande puede contener un número mayor de cajas String cada una con su matriz de módulos y colocadas en cascada cuya salida de cada una de las etapas sea una línea de potencia de mayor sección para que las pérdidas en la señal sean mínimas a medida que aumenta el valor de la señal de potencia.

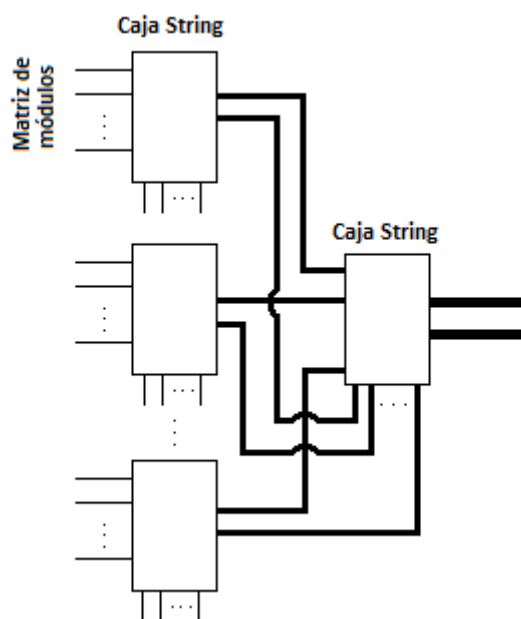


Fig.20 Cajas String en cascada

La última caja string está directamente conectada al inversor fotovoltaico. Este componente es el encargado de transformar la señal de corriente continua a corriente alterna para su posterior inyección en la red de electricidad mediante una red de adaptación. Cabe mencionar que el inversor fotovoltaico también puede estar compuesto de varias entradas para la conexión directa de varias cajas String.

2.1.1 Modelo te3rico Campo Solar Fotovoltaico

Para poder conocer bien el funcionamiento de un campo solar fotovoltaico se va a introducir el modelo te3rico de cada una de las partes divisibles del mismo, como son, los m3dulos fotovoltaicos, las l3neas de potencia y el inversor de onda senoidal. En los siguientes apartados se caracterizar3 cada uno de ellos mediante su circuito equivalente y modelo matem3tico.

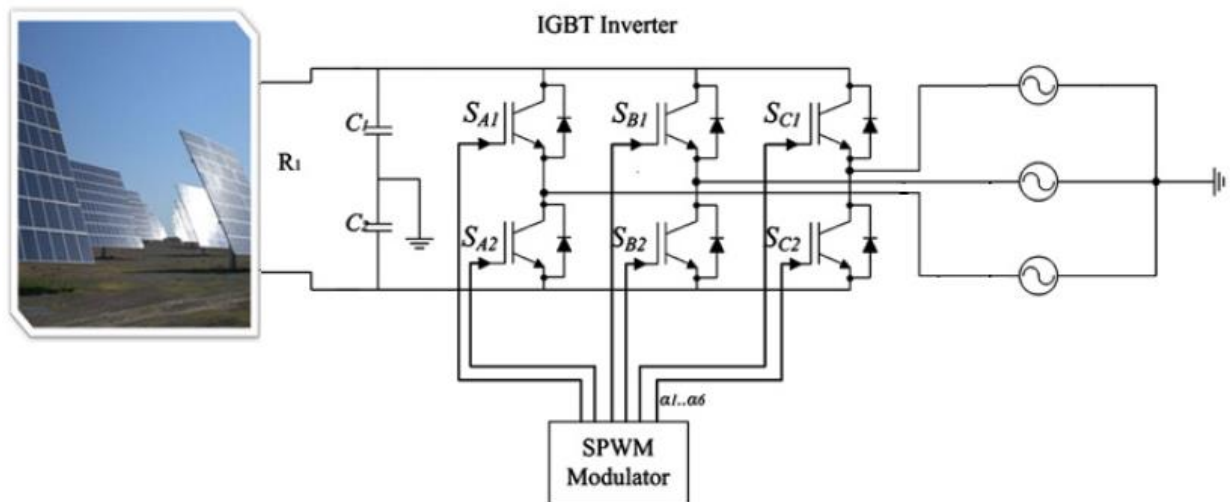


Fig.21 Modelo de Sistema solar fotovoltaico

En la imagen de la figura 21 se observa una instalaci3n solar fotovoltaica conectada a la red de electricidad trif3sica.

2.1.2 Modelo te3rico Generador Fotovoltaico

Los m3dulos fotovoltaicos son los encargados de la generaci3n de la se3al de potencia mediante el denominado efecto fotovoltaico. 3stos est3n compuestos por c3lulas fotovoltaicas de materiales semiconductores (t3picamente de silicio cristalino) los cuales generan un paso de corriente proporcional al flujo luminoso que reciben. La incidencia de fotones aporta la energ3a necesaria en el semiconductor para que un electr3n que se encuentre en la capa de valencia rompa su enlace y salte a la capa de conducci3n generando un hueco (espacio libre considerado con carga positiva) en la capa de valencia. Esto provoca que un electr3n que estaba a su alrededor ocupe el hueco que qued3 libre generando a su vez otro hueco en lo que se denomina el

proceso de recombinaci3n. De esta forma se origina un flujo de corriente el3ctrica que recibe el nombre de fotocorriente o corriente de iluminaci3n I_L .

A continuaci3n se muestra el circuito equivalente de una c3lula solar fotovoltaica:

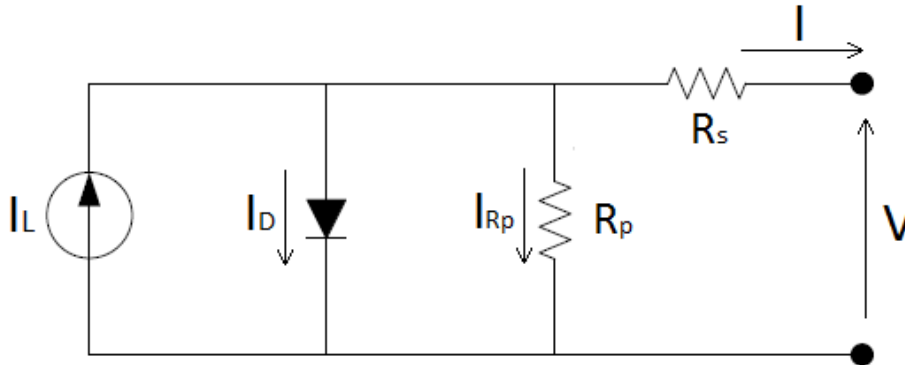


Fig. 22: Modelo te3rico equivalente de una c3lula fotovoltaica

Aplicando la teor3a de circuitos al circuito de la figura se puede deducir la siguiente ecuaci3n para la obtenci3n de la corriente generada por la c3lula:

$$I = I_L - I_D - I_{Rp}$$

La corriente de la resistencia en paralelo, tambi3n conocida como resistencia de Shunt, se puede deducir aplicando las leyes de Kirchhoff en el 3ltimo lazo:

$$V = I_{Rp} \cdot R_p - I \cdot R_s \rightarrow I_{Rp} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p}$$

El modelo matem3tico empleado para aproximar el comportamiento del diodo es el de Shockley y viene dado por la siguiente ecuaci3n:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

Donde

- I es la intensidad de corriente que atraviesa el diodo
- V_D es la tensi3n que cae en el diodo, es decir, diferencia de tensi3n entre sus extremos.

- I_0 es la corriente de saturaci3n de oscuridad del diodo. 3sta es aproximadamente de 10^{-12} A/cm² por c3lula.
- n es el coeficiente de emisi3n y tiene valores desde ser de 1 para el germanio hasta el orden de 2 para el silicio.
- V_T es el voltaje t3rmico y es $V_T = mkT/e$, donde e es la carga del electr3n ($1,609 \cdot 10^{-19}$ C), m el factor de idealidad del diodo (normalmente 1), k la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/°K). El voltaje t3rmico a una temperatura de 25 grados cent3grados es: $V_T(25^\circ C) = 25'7mV$.

Sustituyendo las ecuaciones en el modelo te3rico de una c3lula fotovoltaica [41],[42],[44], se tiene la curva I-V:

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + IR_s}{V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

La resistencia en paralelo R_p corresponde a peque1as fugas de corriente por las superficies laterales, cortocircuitos met3licos o a picos de difusi3n. La resistencia en serie R_s es debida a efectos de dise1o y fabricaci3n de la c3lula, a la resistencia del semiconductor, resistencias de los contactos metal-semiconductor, a las corrientes laterales de la cara iluminada y a la resistencia de la rejilla met3lica frontal.

2.1.3 Curva I/V de un campo solar fotovoltaico.

Ya se detall3 el modelo te3rico de una c3lula solar fotovoltaica. 3stas est3n pensadas para generar del orden de 0,5V pero el objetivo es poder alcanzar tensiones bastantes mayores por cada m3dulo dadas las especificaciones de fabricantes de inversores, los cuales requieren de un voltaje m3nimo de entrada al mismo. Para ello, los m3dulos est3n compuestos de una asociaci3n de c3lulas conectadas en serie y 3stos como ya se comentara con anterioridad se conectan mediante una matriz de cadenas de m3dulos conectados en paralelo.

La asociación de muchos módulos en serie se puede visualizar también como la asociación de un gran número de células fotovoltaicas conectadas en serie. El principal inconveniente radica en el aumento de la probabilidad de la presencia de efectos de desacoplamiento entre corrientes. Esto se debe a que al estar conectados entre sí formando un solo lazo de circuito la corriente resultante que atraviesa la string corresponde a la del módulo que entregue el menor valor de corriente. En grandes instalaciones fotovoltaicas las pérdidas pueden alcanzar el 25% de su máxima potencia.

Este efecto es conocido como “mismatching” o dispersión de parámetros y tiene lugar cuando una célula se rompe, se ensucia o sombrea parcialmente provocando un cambio en su modo de funcionamiento pudiendo llegar a trabajar incluso en inversa disipando la energía producida por el resto de células. Una forma de minimizar los problemas es mediante la utilización de diodos de paso colocados en paralelo cada cierto número de células, para evitar la polarización inversa de las células que entren en dicho estado.

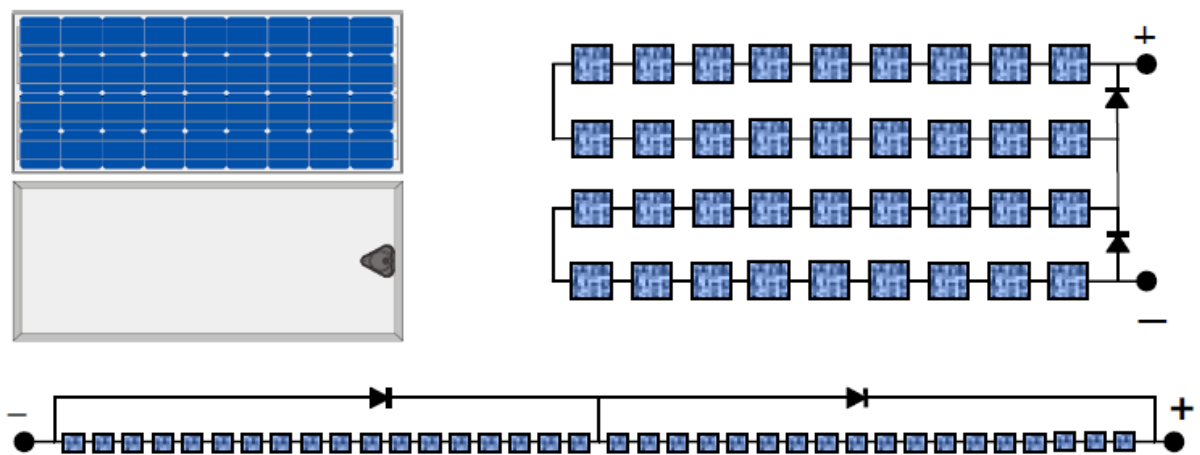


Fig.23: Configuración serie de diodos de paso [45]

Teniendo en cuenta los factores anteriores se puede obtener la característica I-V de un generador fotovoltaico con células de silicio mediante la siguiente expresión:

$$I = N_p \cdot \left[I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{V}{N_s} + I \frac{R_s}{N_p} \right) - 1 \right) - \frac{V}{N_s} + I \frac{R_s}{N_p} \right] - \frac{V}{R_p}$$

Donde N_s y N_p representan el número de células puestas en serie y paralelo respectivamente.

A continuación se muestran en la gráfica de la figura 24 las curvas características Corriente-Tensión I-V y Potencia-Tensión P-V de una célula fotovoltaica:

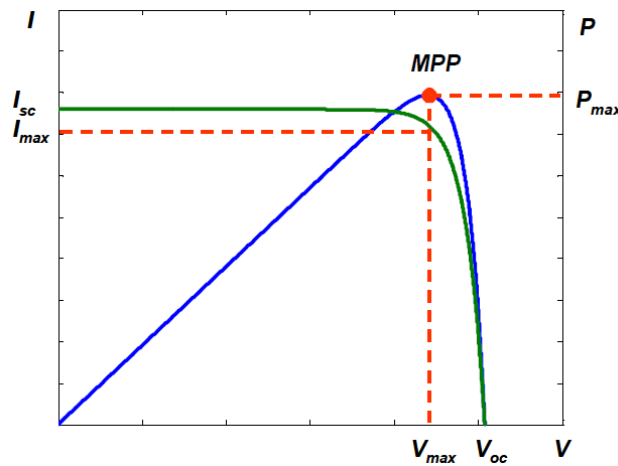


Fig.24: Curvas I-V y P-V de una célula fotovoltaica [41]

En ella es posible observar los parámetros que determinan el funcionamiento observando la corriente de cortocircuito I_{sc} (SC \rightarrow Short-Circuit), la tensión de circuito abierto V_{oc} (OC \rightarrow Open Circuit) y las coordenadas del punto de máxima potencia de la agrupación fotovoltaica (MPP-Maximum Power Point).

La ecuación obtenida para la característica I-V de un módulo fotovoltaico puede ser simplificada a través de una serie de deducciones y suposiciones, tales como:

- Los efectos de la resistencia en paralelo son despreciables

- La corriente generada I_L y la corriente de cortocircuito I_{sc} pueden considerarse iguales. La deducci3n viene de $I(V = 0) \cong I_{sc}$ suponiendo que suponiendo que la tensi3n en circuito abierto de las c3lulas fotovoltaicas es $V_{oc} > I \cdot R_s$
- En circuito abierto se considera que $I=0$ por lo que:

$$V_{oc} = V_t \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \cong V_t \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0}\right)$$

Asumiendo que $I_{sc} \gg I_0$ la expresi3n para I_0 queda:

$$I_0 = I_{sc} \cdot \exp\left(\frac{-V_{oc}}{V_t}\right)$$

Y sustituyendo esta expresi3n en la de partida y asumiendo que $\exp(V_{oc}/V_t) \gg 1$, la expresi3n queda:

$$I_G = I_{SCG} \left(1 - \exp\left(\frac{V_G - V_{OCG} + I_G R_{SG}}{N_s V_t}\right) \right)$$

Donde:

$$I_{SCG} = I_{sc} \cdot N_p$$

$$V_{OCG} = V_{oc} \cdot N_s$$

$$R_{SG} = \frac{R_s \cdot N_s}{N_p}$$

2.1.4 Modelo te3rico Inversor

El inversor depende del rango del voltaje de entrada al mismo procedente de las l3neas de potencia del campo solar fotovoltaico y a su vez del voltaje de trabajo de la red el3ctrica. Para ello se pueden encontrar inversores de conexi3n a red monof3sicos (que se adaptan a la red monof3sica a 230 V_{AC}) e inversores trif3sicos (se adaptan a la red trif3sica a 400V_{AC}). De cualquier forma, el rendimiento del inversor debe ser alto para evitar p3rdidas y est3 en torno al 90%, siendo normal el 94% para inversores de onda senoidal.

A continuaci3n se muestra el esquema t3pico de un inversor de onda senoidal el cual est3 compuesto de varios pares de transistores.

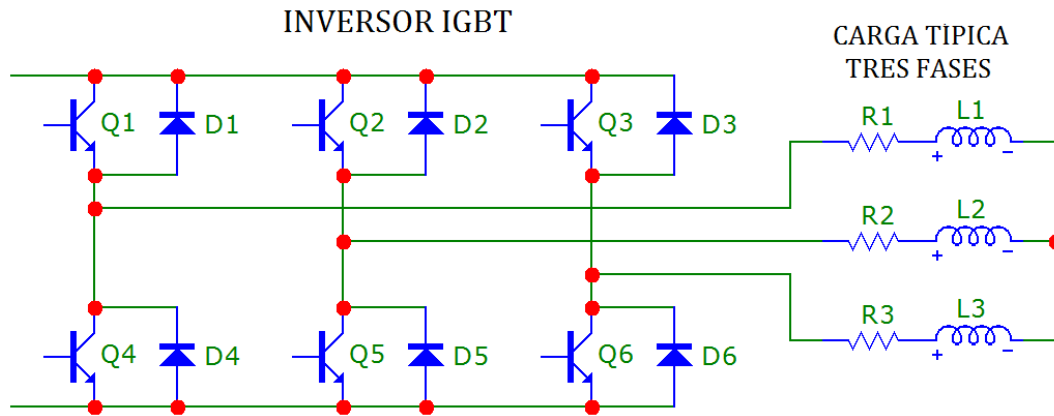
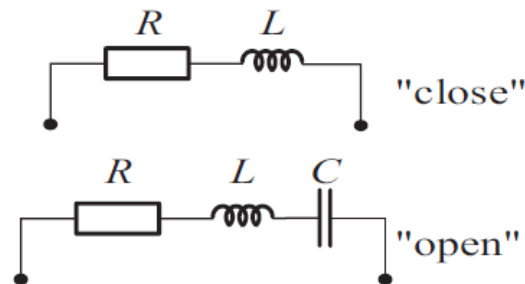


Fig.25: Esquema Inversor IGBT trif3sico

Para un inversor trif3sico es necesario que haya 6 transistores. En el caso de la figura 25, el inversor est3 compuesto por 6 transistores IGBT y la salida de cada par se adapta a la se3al con la frecuencia que corresponda en cada una de las tres l3neas de la red trif3sica de electricidad.

El comportamiento de los inversores se puede modelar tambi3n a trav3s de par3metros concentrados. De esta forma es posible sustituir en el montaje experimental su circuito equivalente. C. Konat3 propone [39] el modelo de inversor IGBT en circuito cerrado y circuito abierto, incluyendo en su estudio los valores de los par3metros obtenidos



$$C = 2.1 \text{ nF}, L = 123 \text{ nH}, R = 0.3 \text{ } \Omega.$$

Fig.26: Modelo Inversor IGBT en circuito cerrado y en circuito abierto

2.1.5 Cableado

El cableado utilizado, al igual que el sistema fotovoltaico en s3, debe poseer unas ciertas caracter3sticas para resistir a las duras condiciones clim3ticas a las que se ve sometido como temperaturas extremas, humedad, impactos, radiaci3n solar, etc.

A falta de una norma, se comenzaron a usar los cables t3picos RV-K muy comunes en cualquier instalaci3n el3ctrica. No obstante, este tipo de cables est3 muy limitado ante las exigencias del sistema solar fotovoltaico. Los cables recomendados para estos sistemas son del tipo ExZhellent Solar ZZ-F o PV ZZ-F, que son cables unipolares con doble aislamiento con capacidad de transportar corriente continua hasta 1800V de manera eficiente y con gran durabilidad en el tiempo. A continuaci3n se pone un ejemplo de cable comercial con sus caracter3sticas:



Embalaje: Disponible en rollos con film retr3ctilado (longitudes de 50 y 100 m) y bobinas.

CARACTER3STICAS

 Conductor flexible, clase 5/6	 Temperatura m3xima del conductor: 120°C	 Temperatura m3xima en cortocircuito: 250°C (m3ximo 5 s)
 Radio de curvatura: 3 x di3metro exterior	 Marcaje: metro a metro	 No propagaci3n de la llama
 Resistencia a los impactos: AG2. Impacto medio	 Instalaci3n al aire libre: permanente	 Resistencia al agua: AD7 inmersi3n
 Resistencia a los ataques qu3micos: excelente	 Resistencia a las temperaturas ambientales extremas: excelente	 Vida 3til 30 a3os.
 Resistente a los rayos ultravioletas	 Resistencia a grasas y aceites: excelente	 Resistencia a abrasi3n

CONDICIONES DE INSTALACI3N

 Instalaciones solares fotovoltaicas	 Intemperie
---	--

Fig.27: Cable TopSolar PV ZZ-F para tensiones de CC de 1800V y CA 1000V

La secci3n del cable que se requiere instalar en cada tramo del sistema solar fotovoltaico viene dado por la siguiente expresi3n:

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\Delta V \cdot \sigma}$$

68

Donde:

- S: es la secci3n del cable conductor (mm²)
- L: es la longitud del cable (m)
- I: es la intensidad de corriente m3xima que circula por el conductor (A)
- ΔV : es la ca3da de tensi3n m3xima permitida en los conductores. Seg3n IDEA 1,5% m3ximo en conductores de continua.
- σ : es la conductividad del material, que en este caso es el cobre. El cobre presenta una conductividad a temperatura de 20°C de $\sigma = 56 \cdot 10^6 \Omega^{-1}m^{-1}$.

As3 pues, la secci3n del conductor en el tramo que comprende desde la caja string hacia el inversor ser3 mayor que el de los m3dulos hacia 3sta debido a que transporta mayor cantidad de corriente y la longitud de la misma es mayor. A medida que el sistema aumenta en magnitud se requerir3n secciones de cable mayores. El tipo de cable utilizado es un factor a considerar para estudiar la atenuaci3n de la se3al de datos.

Para finalizar se muestra mediante una tabla la gama de productos de uno de los fabricantes m3s asentados en el mercado (General cable). En la tabla se especifican los par3metros de los mismos:

Code	Secci3n transversal	Color	Di3metro exterior	Peso	Radio de curvatura m3n.	M3xima Resist. conductor a 20°C	M3x. corriente en aire	Ca3da de tensi3n en DC
	mm ²		mm ²	kg/km	mm ²	Ω /km	A	V/A.km
1614106	1x1,5	■ ■	4,3	35	18	13,7	30	38,17
1614107	1x2,5	■ ■	5,0	50	20	8,21	41	22,87
1614108	1x4	■ ■	5,6	65	23	5,09	55	14,18
1614109	1x6	■ ■	6,3	85	26	3,39	70	9,445
1614110	1x10	■ ■	7,9	140	32	1,95	96	5,433
1614111	1x16	■ ■	8,8	200	35	1,24	132	3,455
1614112	1x25	■ ■	10,5	295	42	0,795	176	2,215
1614113	1x35	■ ■	11,8	395	47	0,565	218	1,574

Fig.28: Caracter3sticas cable Exzhellent Solar seg3n secci3n

2.2 Caracterizaci3n del medio

2.2.1 Espectro de frecuencia. Medios de transmisi3n.

El estudio de la transmisi3n de una portadora en cualquier medio de transmisi3n depende fundamentalmente de la frecuencia de la portadora inyectada al medio y, por tanto, de la longitud de onda del mismo ya que 3sta es inversamente proporcional a la frecuencia (relaci3n $\lambda = \frac{c}{f}$, donde c equivale a la velocidad de la luz).

Por tanto, ser3 importante conocer de antemano la divisi3n del espectro electromagn3tico en sus bandas m3s caracter3sticas:

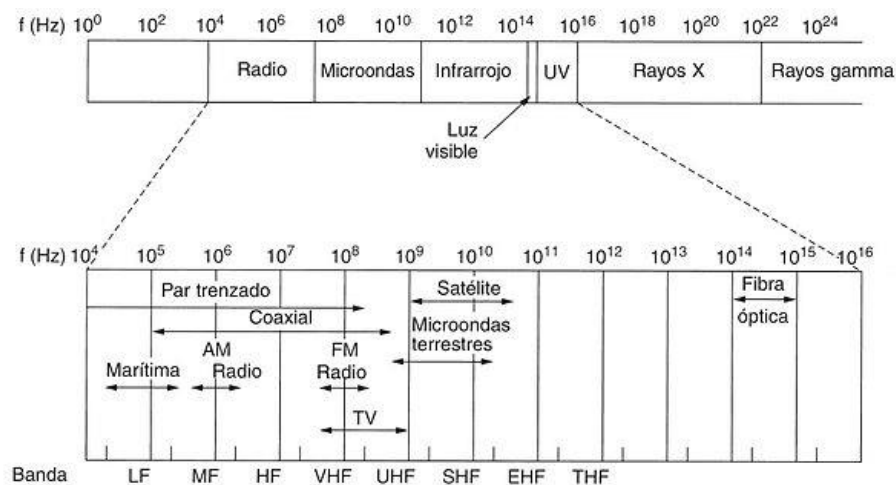


Fig.29. Espectro electromagn3tico y sus usos para las comunicaciones

El mismo est3 dividido en las siguientes bandas:

S3mbolo	Frecuencia
VLF	3-30KHz
LF	30-300KHz
MF	300-3000KHz
HF	3-30MHz
VHF	30-300MHz
UHF	300-3000MHz
SHF	3-30GHz
EHF	30-300GHz
	300-3000GHz

Fig.30. Bandas de frecuencia del espectro electromagn3tico

Cuando la frecuencia de la se1al de datos inyectada en el medio de transmisi3n adquiere valores inferiores al rango de ondas de radio se puede aplicar para el estudio la teor3a de circuitos. Cuando la frecuencia es mayor y empieza a aproximarse al rango de las ondas de microondas (de 300MHz a 300 GHz), se manifiestan efectos que afectan al funcionamiento como:

- Efectos de propagaci3n: no es v3lida la Teor3a de Circuitos, al ser el tama1o comparable a la longitud de onda.
- Efectos de radiaci3n.
- Efectos par3sitos, ya que los componentes no se pueden considerar ideales.

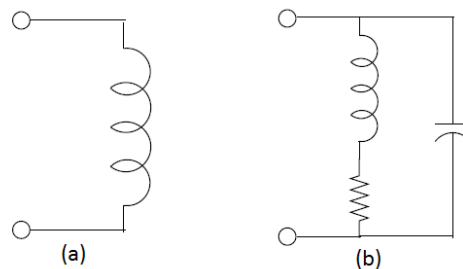


Fig.31: (a) Inductor ideal (b) Modelo para altas frecuencias

- Efecto pelicular: la corriente circula s3lo por la superficie de los conductores, increment3ndose su resistividad.
- Al incorporar los elementos a un circuito, interactúa con los otros elementos al decrecer el campo en funci3n de $1=r$ en lugar de $1=r^2$ como decrece a bajas frecuencias.

As3 pues, con frecuencias de transmisi3n que comiencen a aproximarse a la banda de microondas es necesario aplicar la teor3a de microondas. El estudio que se realiza en el presente trabajo de tesis no requiere velocidades de transmisi3n muy altas debido a que la necesidad del sistema es mostrar valores cada cierto per3odo de tiempo para monitorizar el funcionamiento del campo solar fotovoltaico, por lo que la velocidad no es cr3tica. Sin embargo, estas frecuencias distan bastante de la frecuencia de se1ales que suele transportar las l3neas de potencia como son las se1ales de corriente alterna, de 50-60Hz

aproximadamente según lugar. Es necesario aplicar la teoría de microondas aunque, como se detalla más adelante, se puede realizar ciertas suposiciones que permite simplificar los modelos y aplicar también la teoría de circuitos en términos de parámetros concentrados pudiendo considerar los componentes resistivos ideales (efectos parásitos despreciables).

2.2.2 Modelo de línea de transmisión

Como se comentó en apartados anteriores, la transmisión de una señal de información sobre una línea de potencia va a resultar afectada por los parámetros resistivos, capacitivos e inductivos de la propia línea, ya que consumen potencia activa y reactiva respectivamente.

Estos parámetros pueden ser clasificados en dos grupos, concentrados o distribuidos, según si su funcionamiento se ve afectado en el tiempo ante cualquier condición que se presente en el circuito que no permita ser idealizado. Esto también depende de si las dimensiones de la línea son mucho menores que la longitud de onda (concentrados) o tienen dimensiones comparables (distribuidos). En este caso y por las razones descritas en el apartado anterior estos parámetros van a ser simulados por elementos pasivos en forma de parámetros concentrados que consumen potencia (activa o reactiva) de forma constante. Ésta junto a los algoritmos que se obtengan del mismo van a determinar la fiabilidad y la precisión del modelo.

Los modelos se pueden obtener principalmente según el enfoque de dos maneras: “top-down” (de arriba hacia abajo) y “bottom-up” (de abajo hacia arriba) [43]. En el primero de ellos los parámetros se obtienen a partir de mediciones por lo que el modelo es propenso a errores de medición, incluidos los errores introducidos por los aparatos de medida. Por el contrario, el enfoque bottom-up está basado en un modelo teórico y requiere un esfuerzo mayor computacional pero se consigue conocer, de forma ajustada, la relación entre el comportamiento del circuito y el modelo de parámetros mediante un modelo matemático conocido como función de transferencia. De entre las dos, se ha escogido el enfoque bottom-up por ser el más versátil y flexible ya que los parámetros son formulados.

La línea de potencia se puede considerar como una línea bifilar como la mostrada en la figura 32.

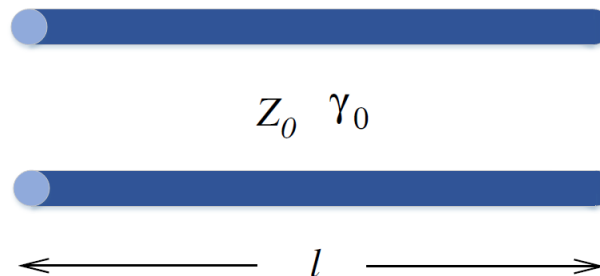


Fig.32: Símbolo de línea de transmisión

La línea queda totalmente caracterizada por su impedancia característica (Z_0), la constante de propagación (γ_0) y su longitud (l). Como es de suponer al observar la figura 32, la línea es un elemento de parámetros distribuidos en el que se ponen de manifiesto los fenómenos de propagación de ondas con los correspondientes fenómenos de disipación y almacenamiento de energía.

Cualquier fenómeno eléctrico o magnético se puede resolver mediante la utilización de las ecuaciones de Maxwell. En medios de transmisión con simetría de traslación como el presente, las ecuaciones tienen soluciones de ondas guiadas y dependiendo de la estructura del medio de transmisión las soluciones particulares a estas ecuaciones se llaman modos de propagación. Los modos de propagación son tres:

- Modo transversal electromagnético (modo TEM): carecen de componentes axiales.
- Modo transversal magnético (modo TM): la componente axial del campo magnético es cero.
- Modo transversal eléctrico (modo TE): la componente axial del campo eléctrico es cero.

El **modo de propagación** en una línea de transmisión es **TEM**, dada la simetría, además de poseer dos conductores entre los cuales puede

establecerse una diferencia de potencial. Las soluciones a las ecuaciones del campo el3ctrico y campo magn3tico pueden ser asociadas directamente a las soluciones circuitales puesto que la tensi3n es la circulaci3n del campo el3ctrico a lo largo de una l3nea de campo que se dirige de un conductor a otro y la corriente es la circulaci3n del campo magn3tico a lo larga de una l3nea.

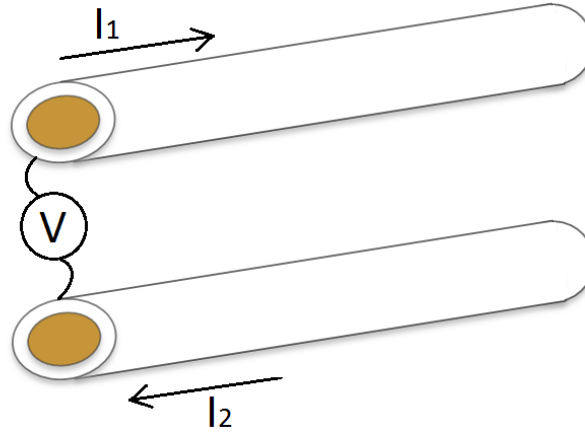


Fig.33: Secci3n de l3nea de transmisi3n

Las soluciones resultan:

$$V(z) = V_0 e^{-\gamma z} \quad (1.a)$$

$$I(z) = I_0 e^{-\gamma z} \quad (1.b)$$

Donde

$$\gamma = j\omega \sqrt{\mu \epsilon_{eq}} \quad y \quad (2.a)$$

$$Z_{TEM} = \frac{V(z)}{I(z)} = \frac{V_0}{I_0} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_{eq}}} \quad (2.b)$$

Ambos par3metros, constante de propagaci3n e impedancia intr3nseca, vienen expresadas en t3rminos de la permeabilidad magn3tica μ y de la constante diel3ctrica o permitividad relativa ϵ del medio, adem3s de la primera de ellas ser directamente proporcional a la frecuencia de transmisi3n ω .

La onda viaja en el sentido de propagaci3n z y los efectos de dispersi3n y absorpci3n se incluyen en la ecuaci3n mediante una onda reflejada propag3ndose en sentido contrario:

$$V(z) = V_0^+ e^{-\gamma_0 z} + V_0^- e^{\gamma_0 z} \quad (3.a)$$

$$I(z) = I_0^+ e^{-\gamma_0 z} - I_0^- e^{\gamma_0 z} \quad (3.b)$$

Para modelar la l3nea de transmisi3n se trata como una red de dos puertos, bipuerto o cuadripolo:

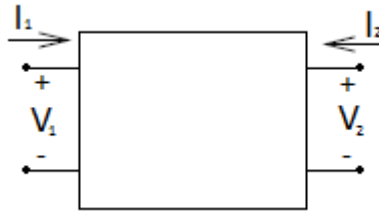


Fig.34: Modelo de una l3nea de transmisi3n como bipuerto

Una De las formas m3s comunes de obtener las ecuaciones que describen el comportamiento de la l3nea es mediante la matriz de impedancias que viene dada por:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4.a)$$

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \quad (4.b)$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \quad (4.c)$$

Las condiciones que debe cumplir el bipuerto son:

$$V_1 = V(z = 0) \quad V_2 = V(z = l)$$

$$I_1 = I(z = 0) \quad I_2 = -I(z = l)$$

Despejando la impedancia en la ecuaci3n 2.b y sustituy3ndola en 3.b:

$$V(z) = V_0^+ e^{-\gamma_0 z} + V_0^- e^{\gamma_0 z} \quad (5.a)$$

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-\gamma_0 z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{\gamma_0 z} \quad (5.b)$$

El objetivo es obtener la matriz de impedancias a partir de las ecuaciones de onda. Aplicando las condiciones de corriente y tensi3n en ellas:

$$V_1 = V(0) = V_0^+ + V_0^-$$

$$I_1 = I(0) = \frac{V_0^+}{Z_0} - \frac{V_0^-}{Z_0}$$

Resolviendo V_0^+ y V_0^- en el sistema de ecuaciones

$$V_0^+ = \frac{1}{2}(V_1 + Z_0 I_1)$$

$$V_0^- = \frac{1}{2}(V_1 - Z_0 I_1)$$

$$V_2 = V(l) = V_0^+ e^{-\gamma_0 l} + V_0^- e^{\gamma_0 l}$$

$$I_2 = I(l) = \frac{1}{Z_0} (V_0^- e^{\gamma_0 l} - V_0^+ e^{-\gamma_0 l})$$

Despejando V_0^+ y V_0^- de este sistema de ecuaciones:

$$V_0^+ = \frac{1}{2}e^{\gamma_0 l}(V_2 - Z_0 I_2)$$

$$V_0^- = \frac{1}{2}e^{-\gamma_0 l}(V_2 + Z_0 I_2)$$

De esta forma se excluyen las variables V_0^+ y V_0^- igualando ambas expresiones obteniendo un nuevo sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} V_1 + Z_0 I_1 = e^{\gamma_0 l}(V_2 - Z_0 I_2) \\ V_1 - Z_0 I_1 = e^{-\gamma_0 l}(V_2 + Z_0 I_2) \end{cases}$$

Restando ambas ecuaciones y despejando V_2 :

$$2Z_0 I_1 = V_2 (e^{\gamma_0 l} - e^{-\gamma_0 l}) - Z_0 I_2 (e^{\gamma_0 l} + e^{-\gamma_0 l})$$

$$V_2 = \left(Z_0 \frac{2}{e^{\gamma_0 l} - e^{-\gamma_0 l}} \right) I_1 + \left(Z_0 \frac{e^{\gamma_0 l} + e^{-\gamma_0 l}}{e^{\gamma_0 l} - e^{-\gamma_0 l}} \right) I_2 = \left(\frac{Z_0}{\sinh \gamma_0 l} \right) I_1 + \left(Z_0 \frac{\cosh \gamma_0 l}{\sinh \gamma_0 l} \right) I_2 \quad (6.a)$$

Sustituyendo el valor en cualquiera de ellas se obtiene V_1 :

$$V_1 = \left(Z_0 \frac{e^{\gamma_0 l} + e^{-\gamma_0 l}}{e^{\gamma_0 l} - e^{-\gamma_0 l}} \right) I_1 + \left(Z_0 \frac{2}{e^{\gamma_0 l} - e^{-\gamma_0 l}} \right) I_2 = \left(Z_0 \frac{\cosh \gamma_0 l}{\sinh \gamma_0 l} \right) I_1 + \left(\frac{Z_0}{\sinh \gamma_0 l} \right) I_2 \quad (6.b)$$

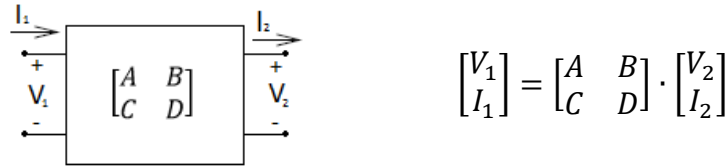
Y comparando con las ecuaciones 4.b y 4.c se obtienen las variables de la matriz de impedancia:

$z_{11} = Z_0 \frac{\cosh \gamma_0 l}{\sinh \gamma_0 l}$	$z_{12} = \frac{Z_0}{\sinh \gamma_0 l}$
$z_{21} = \frac{Z_0}{\sinh \gamma_0 l}$	$z_{22} = Z_0 \frac{\cosh \gamma_0 l}{\sinh \gamma_0 l}$

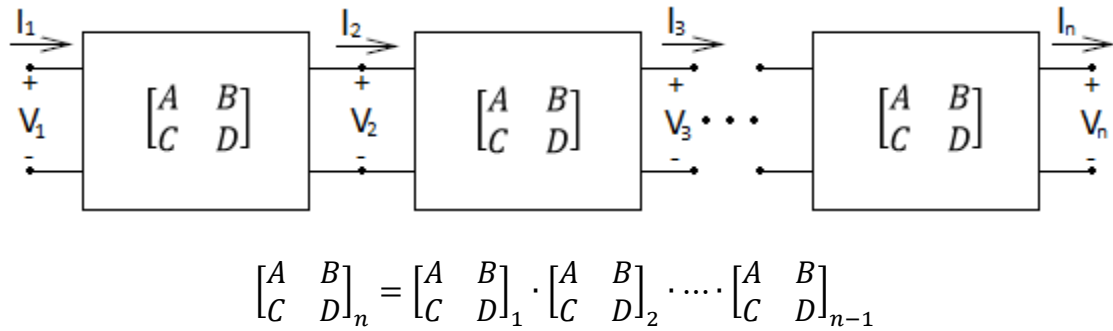
Matriz de Impedancias

De la matriz se observa que $Z_{12} = Z_{21}$ dado que es una red rec3proca y que $Z_{11} = Z_{22}$ dado que es tambi3n sim3trica como se puede apreciar claramente en la figura 33.

Cuando se tienen varios circuitos modelados como bipuertos conectados en cascada, lo mejor es trabajar con la matriz de transmisi3n.



La principal ventaja se encuentra en que la matriz de transmisi3n de varios bipuertos conectados en cascada es el producto de las matrices de cada bipuerto:



Para establecer la relaci3n entre la matriz de impedancias y la de transmisi3n es necesario tener en cuenta el criterio de signos puesto que I_2 ahora es saliente y no entrante. Realizando alguna operaci3n sencilla se obtiene la relaci3n:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11}/z_{21} & \frac{z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}}{z_{21}} \\ 1/z_{21} & z_{22}/z_{21} \end{bmatrix}$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la matriz de impedancias para la l3nea de transmisi3n se obtiene la matriz de transmisi3n:

$A = \cosh \gamma_0 l$	$B = Z_0 \sinh \gamma_0 l$
$C = (1/Z_0) \sinh \gamma_0 l$	$D = \cosh \gamma_0 l$

Matriz de Transmisi3n

Otra forma de modelar la l3nea es asociando cualquiera de las matrices anteriores a un circuito equivalente en T o en Π (pi). La equivalencia con el circuito en T es directa como se observa en la siguiente figura:

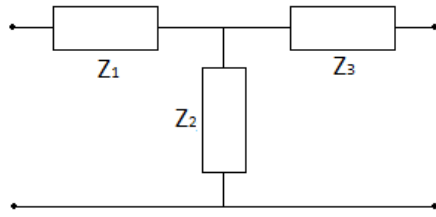


Fig. 35: Circuito equivalente en T

$$z_{11} = Z_1 + Z_2$$

$$z_{12} = Z_2$$

$$z_{21} = Z_2$$

$$z_{22} = Z_2 + Z_3$$

Como la l3nea es sim3trica y rec3proca $Z_1=Z_3$. Despejando los valores de 3stos:

$$\begin{aligned} Z_1 = Z_3 &= \frac{Z_0}{\sinh \gamma_0 l} (\cosh \gamma_0 l - 1) \\ Z_2 &= \frac{Z_0}{\sinh \gamma_0 l} \end{aligned}$$

El circuito en PI se representa mediante admitancias y se obtiene directamente de la matriz de admitancias, que no se ha mostrado anteriormente, pero tiene su equivalencia con la matriz de impedancias y por tanto con la de transmisi3n. A continuaci3n se muestra el circuito y las equivalencias:

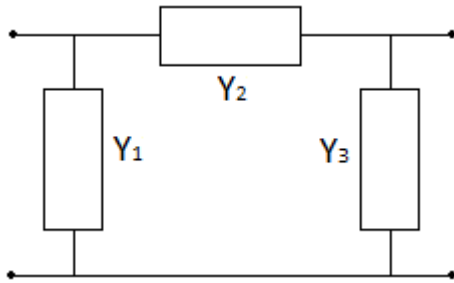


Fig. 36: Circuito equivalente en PI

$[Y]$	$[A \ B \ C \ D]$
$y_{11} = Y_1 + Y_2$	$A = 1 + Y_3/Y_2$
$y_{12} = -Y_2$	$B = 1/Y_2$
$y_{21} = -Y_2$	$C = Y_1 + Y_3 + (Y_1 Y_3 / Y_2)$
$y_{22} = Y_2 + Y_3$	$D = 1 + Y_1/Y_2$

Para este circuito no se va a proceder a realizar el c3lculo de la equivalencia con la matriz de transmisi3n ya que se ha seleccionado el **circuito equivalente en T** para el modelo de l3nea utilizado en los experimentos.

Ambos modelos pueden ser expresados a trav3s de los par3metros distribuidos de los que est3 compuesto una l3nea de transmisi3n (R, L, G, C) los cuales ser3n definidos a continuaci3n.

- Resistencia (R): representa las p3rdidas en los conductores puesto que la conductividad no es infinita (el del cobre es $\sigma = 56 \cdot 10^6 S/m$ a temperatura de 20°C) tal y como se supuso en los modos TEM. As3 pues, en la constante de propagaci3n que defin3amos al principio es necesario a3adir una constante de atenuaci3n α_c : $\gamma_0 = j\omega\sqrt{\mu\epsilon} + \alpha_c$.

La resistencia viene expresado en funci3n de las caracter3sticas del conductor:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (\Omega/m)$$

donde ρ es la resistividad del conductor, L la longitud y S la secci3n del mismo. No obstante, los fabricantes de l3neas suelen dar este par3metro.

- Conductancia (G) debido a las p3rdidas que produce el diel3ctrico que separa ambos conductores por unidad de longitud (S/m). De acuerdo con la ley de Ohm, en el aislamiento se verifica que:

$$G = \frac{1}{\bar{R}} = \frac{\bar{I}}{\bar{U}} \quad (S/m)$$

donde \bar{R} representa la resistencia del aislamiento, \bar{I} la intensidad de corriente en el aislamiento y \bar{U} la diferencia de potencial entre el conductor y tierra.

- Inductancia (L): Como se dijo con anterioridad una corriente el3ctrica que circula por una l3nea produce un flujo de magn3tico asociado a un campo magn3tico opuesta al cambio de corriente. La inductancia ese define como la relaci3n entre el flujo magn3tico y la intensidad de corriente el3ctrica y en una l3nea viene expresado por Henrios (en honor al cient3fico Joseph Henry) por la unidad de longitud (H/m). Dicha relaci3n viene dada por la Ley de Faraday, que es una de las ecuaciones de Maxwell y depende de la geometr3a del conductor y del medio en el cual el conductor est3 insertado.

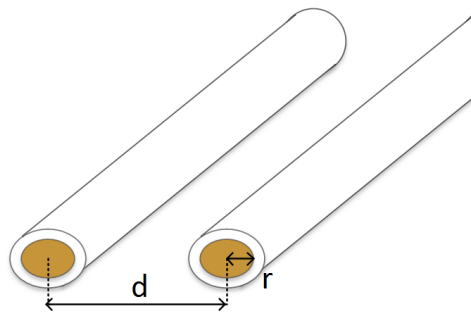


Fig.37: Línea bifilar. Cálculo de parámetros.

Resolviendo la ecuación de Maxwell teniendo en cuenta la geometría de la línea se obtiene la expresión para la inductancia:

$$L = 4 \cdot \ln\left(\frac{d}{r}\right) \cdot 10^{-7} \quad (H/m)$$

- Capacitancia (C): Una corriente alterna que circula por una línea produce un almacenamiento de cargas positivas y negativas en los conductores. A esta distribución de cargas se asocian campos y potenciales eléctricos. La relación entre diferencia de potencial y las densidades de carga correspondientes definen la capacitancia de las líneas que se expresan en faradios (porque fue estudiada por Faraday) por unidad de longitud (F/m). La relación entre cargas y flujo de campo eléctrico es regida por la Ley de Gauss, que es una de las ecuaciones de Maxwell y al igual que la inductancia depende de la geometría del conductor y del medio en el cual el conductor está insertado.

Resolviendo las ecuaciones de Maxwell teniendo en cuenta la geometría de la línea, la conductancia se puede calcular como:

$$C = \frac{1}{18 \ln\left(\frac{d}{r}\right)} \cdot 10^{-10} \quad (F/m)$$

Bajo ciertas suposiciones (longitud de línea y frecuencia de transmisión) los parámetros distribuidos de la línea pueden ser representados mediante parámetros concentrados (bobinas, condensadores y resistencias) como se comentó con anterioridad. El **modelo en T** en función de los parámetros concentrados es el mostrado en la figura 38 dada la simetría ya comentada.

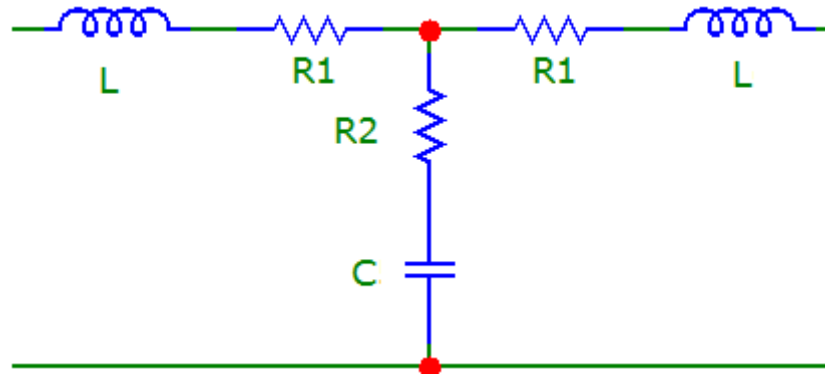


Fig. 38: Circuito equivalente en T de l3nea de potencia

Por 3ltimo, quedar3a relacionar los par3metros distribuidos de la l3nea con los par3metros de transmisi3n, estos son, la impedancia caracter3stica del medio Z_0 y a la constante de propagaci3n γ_0 :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L + R}{j\omega C + G}}$$

$$\gamma_0 = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

Las l3neas de potencia utilizadas en un campo solar fotovoltaico son **l3neas de bajas p3rdidas** para las frecuencias de transmisi3n que se van a manejar en la se3al de informaci3n. Cuando la frecuencia de transmisi3n es lo suficientemente alta se cumple que:

$$R \ll \omega L$$

$$G \ll \omega C$$

Los par3metros primarios se pueden simplificar de la siguiente forma:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L + R}{j\omega C + G}} = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{R}{j\omega L}}{1 + \frac{G}{j\omega C}}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \left(1 + \frac{R}{j\omega L}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{G}{j\omega C}\right)^{-1/2}$$

Teniendo que $\frac{R}{j\omega L} \ll 1$ y $\frac{G}{j\omega C} \ll 1$ se puede realizar las siguientes aproximaciones:

$$(1+x)^{1/2}\big|_{x\rightarrow 0} \cong 1 + \frac{1}{2}x; \quad (1+x)^{-1/2}\big|_{x\rightarrow 0} \cong 1 - \frac{1}{2}x;$$

Aplicando la aproximaci3n:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{R}{j\omega L}\right) \left(1 - \frac{1}{2} \frac{G}{j\omega C}\right) = \sqrt{\frac{L}{C}} \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{R}{j\omega L} - \frac{G}{j\omega C}\right) + \frac{j}{4} \frac{RG}{\omega^2 LC}\right)$$

$$\text{Como } \frac{RG}{\omega^2 LC} \rightarrow 0 \text{ y } \frac{R}{j\omega L} - \frac{G}{j\omega C} \rightarrow 0$$

$$Z_0 \cong \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Para la constante de propagaci3n:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = j\omega\sqrt{LC} \sqrt{\left(1 + \frac{R}{j\omega L}\right) \left(1 + \frac{G}{j\omega C}\right)} \\ &\cong j\omega\sqrt{LC} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{R}{j\omega L}\right) \left(1 - \frac{1}{2} \frac{G}{j\omega C}\right) = j\omega\sqrt{LC} \left(1 - \frac{j}{2} \left(\frac{R}{\omega L} + \frac{G}{\omega C}\right) - \frac{j}{4} \frac{RG}{\omega^2 LC}\right) \\ &\cong j\omega\sqrt{LC} + \frac{\omega\sqrt{LC}}{2} \left(\frac{G}{\omega C} + \frac{R}{\omega L}\right) \cong j\omega\sqrt{LC} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} + \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \end{aligned}$$

$$\gamma_0 \cong j\omega\sqrt{LC} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} + \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Que est3 compuesta por parte real e imaginaria:

$$\beta = j\omega\sqrt{LC}$$

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d = \frac{R}{2Z_0} + \frac{G}{2} Z_0$$

Cuando no se cumple la condici3n de par3metros concentrados y la longitud de onda es comparable a la longitud de la l3nea, se puede modelar la

l3nea como una sucesi3n de cuadripolos en serie para cumplir tramo por tramo dicha condici3n.

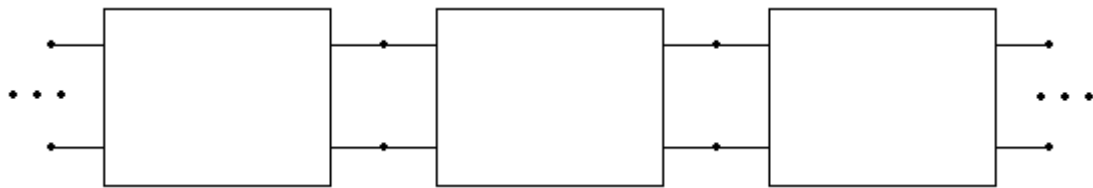


Fig. 39: Red de bipuertos puestos en serie

Cabe mencionar que existe tambi3n una matriz llamada de dispersi3n, equivalente a las mostradas anteriormente cuyos par3metros son s_{11} , s_{12} , s_{21} , s_{22} . Esta matriz es muy utilizada cuando se modela el sistema mediante top-down (de arriba hacia abajo) ya que existen equipos que miden dichos par3metros de forma inmediata 3nicamente situando las sondas entre las bornas que se deseen.

2.3 Filtros

Un filtro es un sistema cuya funci3n es manipular o deformar el espectro de frecuencia de una se3al de entrada (excitaci3n) de acuerdo con los requerimientos especificados. Se emplean para atenuar o amplificar componentes de la entrada con frecuencias dentro de un determinado rango o para rechazar componentes en frecuencias espec3ficas. As3 se pueden definir en ellas tres bandas:

- La banda pasante o banda de paso: conjunto de frecuencias que el filtro deja pasar. Cualquier componente de la entrada cuya frecuencia est3 dentro de este conjunto va a ser transmitido hacia la salida.
- Banda de rechazo: Conjunto de frecuencias que el filtro no deja pasar. Cualquier componente de la entrada cuya frecuencia est3 dentro de este conjunto va a ser rechazada.
- Banda de transici3n: Conjunto de frecuencias entre la banda de paso y la banda de rechazo.

Existen varios tipos de filtros dependiendo del lugar donde se sit3e la banda de paso y de rechazo:

- **Filtros paso de baja:** Conocidos tambi3n como filtros LP, del ingl3s Low-Pass. Su funci3n es dejar pasar las frecuencias bajas con muy poca atenuaci3n y atenuar las altas frecuencias. Para ver esto con claridad, se muestra a continuaci3n la funci3n de transferencia de un filtro ideal LP donde se desprecia la banda de rechazo:

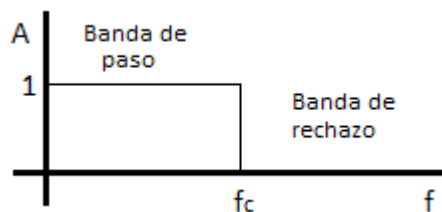


Fig.40: Filtro LP ideal

El filtro deja pasar los componentes en la banda de paso multiplicando de forma ideal por amplitud 1, dej3ndolas tal cual est3n. Los componentes con frecuencia dentro de la banda de rechazo se multiplican de forma ideal por 0.

- **Filtros paso de alta:** Conocidos tambi3n como filtros HP, del ingl3s High-Pass. Su funci3n es dejar pasar las frecuencias altas con muy poca atenuaci3n y atenuar las bajas frecuencias. En la figura se muestra la funci3n de transferencia de un filtro HP ideal:

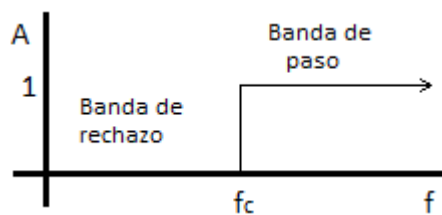


Fig.41: Filtro HP ideal

- **Filtros paso de banda:** Conocidos tambi3n como filtros BP, del ingl3s Band-Pass. Su funci3n es dejar pasar las frecuencias en un rango desde una frecuencia f_{c1} hasta otra f_{c2} con muy poca atenuaci3n y atenuar las frecuencias que est3n fuera de este rango. En la figura se muestra la funci3n de transferencia de un filtro BP ideal:

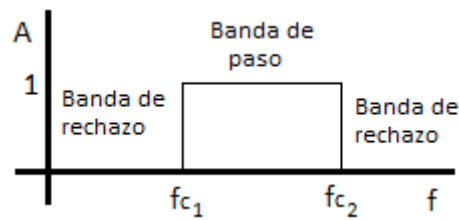


Fig.42: Filtro BP ideal

- **Filtros rechazo de banda:** Conocidos tambi3n como filtros BR. Su funci3n es atenuar las frecuencias en un rango desde una frecuencia f_{c1} hasta otra f_{c2} y dejar pasar el resto con muy poca atenuaci3n. En la figura se muestra la funci3n de transferencia de un filtro BR ideal:

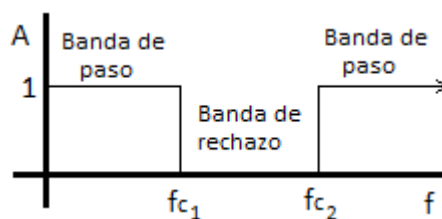
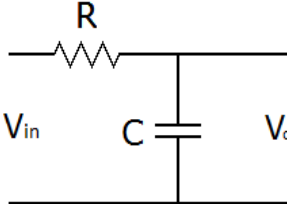
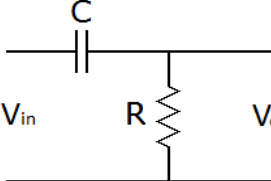
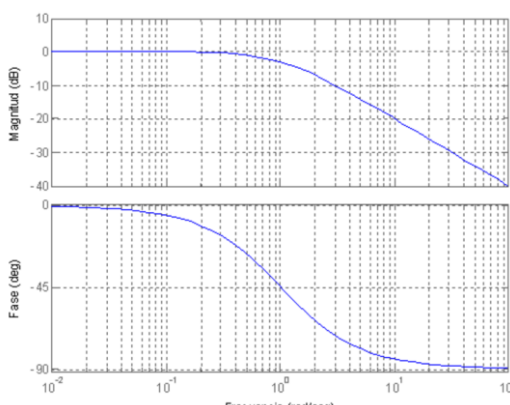
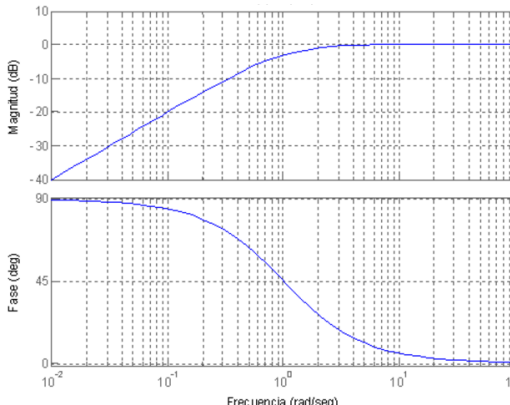


Fig.43: Filtro BR ideal

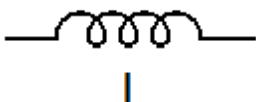
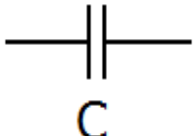
Para la inyecci3n de la se1al de informaci3n a la l3nea de potencia del campo solar fotovoltaico hay que tener en cuenta que la se1al de potencia que transporta es una se1al continua y por tanto su frecuencia es cero. La se1al de informaci3n en cambio es una senoide y posee una cierta frecuencia. Por tanto para poder desvincular ambos bastar3 con:

- Colocar un filtro paso de baja con la frecuencia de corte inferior a la frecuencia de la se1al de informaci3n para dejar pasar la se1al de potencia y restringir el acceso de la se1al de informaci3n
- Colocar un filtro paso alta con frecuencia de corte inferior a la se1al de informaci3n para dejar pasar la se1al de informaci3n y restringir el acceso de la se1al de potencia.

Existen filtros sencillos (de un solo polo) que pueden ser considerados para la soluci3n al problema planteado. Entre ellos se pueden encontrar los filtros mediante circuitos RC:

Filtro LP	Filtro HP
	
$H_0(s = j\omega) = \frac{V_c(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{1 + sRC}$ $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$	$H_0(s) = \frac{sRC}{1 + sRC}$ $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$
	

Para frecuencias altas como las que se dan en transmisión de datos, más aún cuando se aproximan a frecuencias de microondas, se pueden utilizar los componentes reactivos como filtros, esto es, a través de condensadores y bobinas.

Filtro LP	Filtro HP
	
$Z_L = j\omega L$	$Z_C = \frac{1}{j\omega C}$

Todos los anteriores son filtros de primer orden. A continuación se muestra otro tipo de filtros mediante componentes reactivos de segundo orden que serán útiles en la práctica. Por un lado se pueden escoger filtros rechazo de

banda o BR que consiste en la suma de un filtro paso baja y un filtro paso alta. Como se ve3a antes el paso baja de primer orden basado en reactancias es la bobina y el paso alta el condensador, as3i pues:

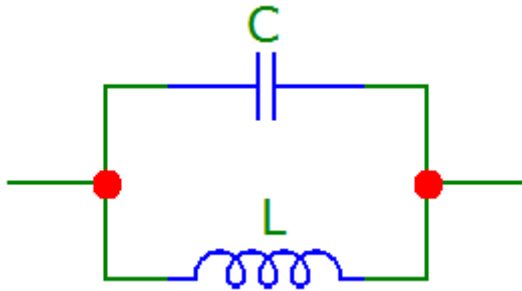


Fig.44: Filtro Rechazo de banda

La funci3n de transferencia viene dada por

$$H(\omega) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{j\omega L}} = \frac{1\omega L}{1 - \omega^2 LC}$$

Por otro lado est3 el **filtro paso baja de tipo k o de k-constante** al cual se har3 especial menci3n puesto que es un el elegido en el esquema final del sistema:

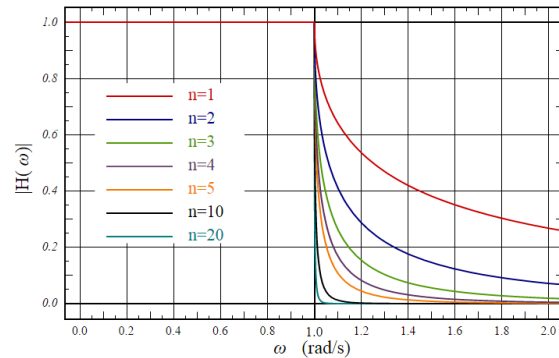
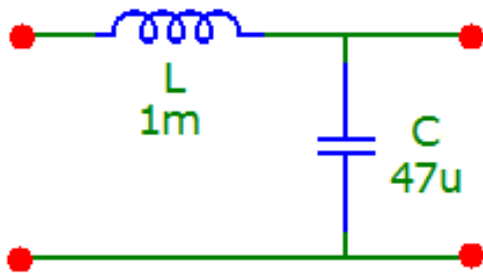


Fig.45: Filtro tipo k y funci3n de transferencia del mismo.

En el gr3fico derecho de la figura 45 se muestra la funci3n de transferencia del filtro con las distintas curvas dependiendo el n3mero de 3ste que se ponga en cascada. La misma viene dada por la siguiente expresi3n:

$$H(\omega) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC}$$

La frecuencia de corte del mismo viene dada por el polo doble que posee, que sin entrar en detalles, se da cuando se anula el denominador de la funci3n, esto es, cuando $\omega^2 LC = 1 \rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

2.4 Modulaci3n de la se1al

La modulaci3n es el m3todo que permite transmitir diferentes se1ales de informaci3n de forma simult3nea en un 3nico medio de transmisi3n. Consiste en la variaci3n de los par3metros (frecuencia, fase o amplitud) de una se1al portadora de acuerdo a las variaciones de una se1al de informaci3n o moduladora.

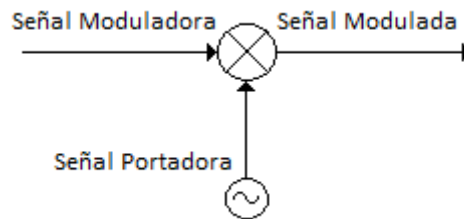


Fig. 46: Modulaci3n de una se1al

Para ello es necesario una se1al portadora de frecuencia superior a la se1al de informaci3n (moduladora) que mezclada con 3sta en banda base (su banda de frecuencias natural) producir3 una se1al de amplitud, frecuencia o fase variables. Seg3n el par3metro que se haga variar, la modulaci3n puede ser en amplitud (AM), en frecuencia (FM) o en fase (PM) siendo conocidos 3stas dos 3ltimas por su similitud como modulaci3n angular.

Para la representaci3n de datos digitales en su sucesi3n de valores binarios se utilizan las modulaciones digitales. Las m3s t3picas son las modulaciones por desplazamiento y son:

- **Modulaci3n ASK** (Amplitude-shift keying) o modulaci3n por desplazamiento en amplitud. En 3sta el valor l3gico '0' es representado por la ausencia de una portadora y el '1' con una portadora de una cierta frecuencia

$f(t) = A \sin(\omega_c t)$. La se1al modulada es la siguiente:

$$\phi_1(t) = A \sin(\omega_c t) \leftrightarrow 0 < t \leq T$$

$$\phi_2(t) = 0 \text{ en cualquier otro caso}$$

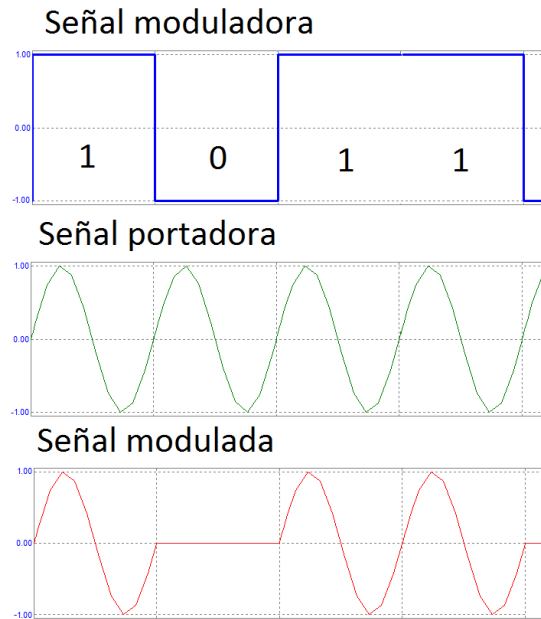


Fig. 47: Ejemplo modulaci3n ASK

- **Modulaci3n FSK** (Frequency Shift Keying) o modulaci3n por desplazamiento en frecuencia. En 3sta, el valor l3gico '0' es representado por una se1al portadora con una cierta frecuencia ω_1 y el '1' con una portadora de frecuencia distinta ω_2 . mayor a la anterior. La se1al modulada es la siguiente:

$$\begin{aligned}\phi_1(t) &= A\sin(\omega_1 t) \leftrightarrow 0 < t \leq T \\ \phi_2(t) &= A\sin(\omega_2 t) \leftrightarrow \text{en cualquier otro caso}\end{aligned}$$

Donde

$$\omega_1 < \omega_2$$

$\phi_1(t)$ equivale a 0 binario

$\phi_2(t)$ Equivale a 1 binario

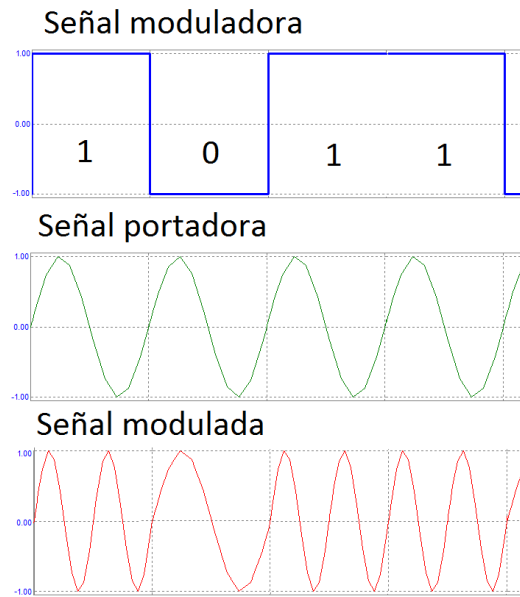


Fig. 48: Ejemplo modulaci3n FSK

- **Modulaci3n PSK** (Phase shift keying) o modulaci3n por desplazamiento en fase. En 3sta, el valor l3gico '0' es representado por una se3al portadora con una cierta frecuencia ω_1 y el '1' con una portadora de caracter3sticas similares pero desfasada 180° respecto a la anterior. La se3al modulada es la siguiente:

$$\begin{aligned}\phi_1(t) &= A\sin(\omega_c t) \leftrightarrow 0 < t \leq T \\ \phi_2(t) &= -A\sin(\omega_c t) \leftrightarrow \text{en cualquier otro caso}\end{aligned}$$

Donde

$\phi_1(t)$ equivale a 1 binario

$\phi_2(t)$ equivale a 0 binario

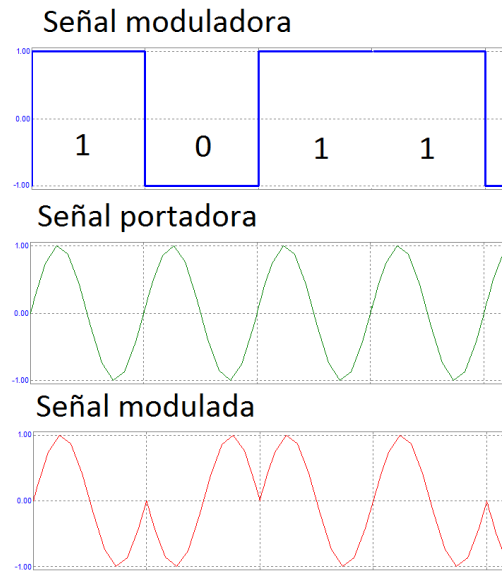


Fig. 49: Ejemplo modulaci3n PSK

El esquema general de la modulaci3n para las anteriores t3cnicas se presenta en la figura 50, el cual es sencillo de interpretar con lo expuesto anteriormente.

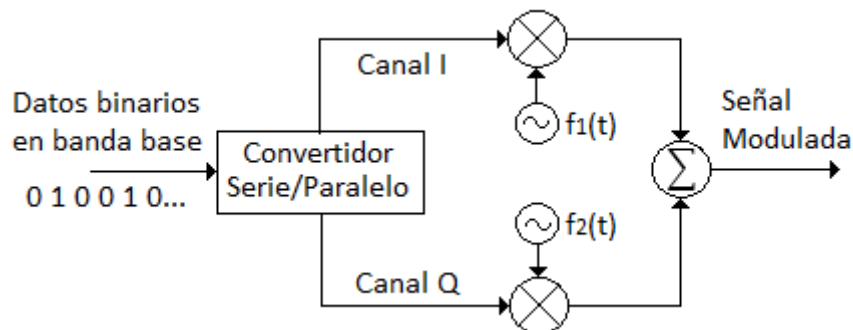
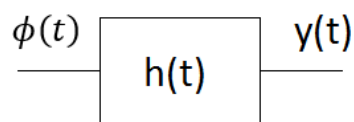


Fig.50: Esquema de modulaci3n digital

Todas estas se1ales, independientemente del tipo de modulaci3n, se pueden detectar aplicando un filtro acoplado con la respuesta al impulso $h(t) = \phi(T - t)$. La salida del filtro vendr3 dada por la siguiente expresi3n, la cual se conoce como la **autocorrelaci3n** de una se1al:



$$y(t) = \phi(t) \otimes h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t)\phi(T - t + \tau)d\tau$$

La salida de éste último es enviada a un detector que identifica la señal. El tiempo de decisión óptimo es el instante T en el cual la salida del filtro coincide con la señal de energía para este instante $y(T) = E = A^2(T/2)$.

El esquema general de la demodulación y detección del símbolo recibido se representa en la figura 51.

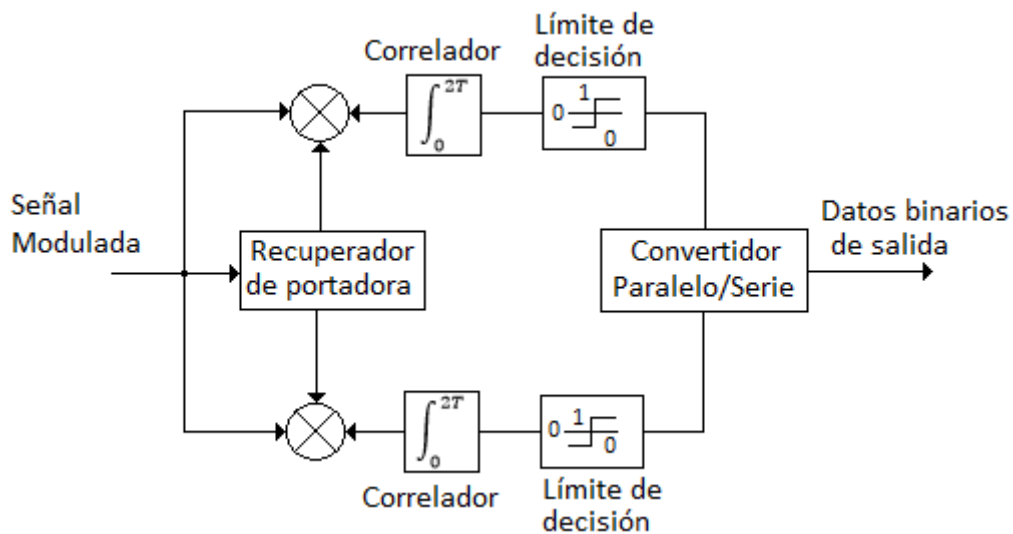


Fig.51: Esquema demodulador digital

La señal analógica es dividida y enviada a cada parte donde se realiza la correlación con cada uno de las señales portadoras. La salida de ambas tiene como resultado las señales conocidas como en fase I(t) y en cuadratura Q(t) y se representan en un “**Diagrama de Constelación**” donde se muestra la relación de amplitud y fase de una portadora modulada digitalmente y por tanto el módulo y la fase de cada una de las posibles señales que conforman una modulación.

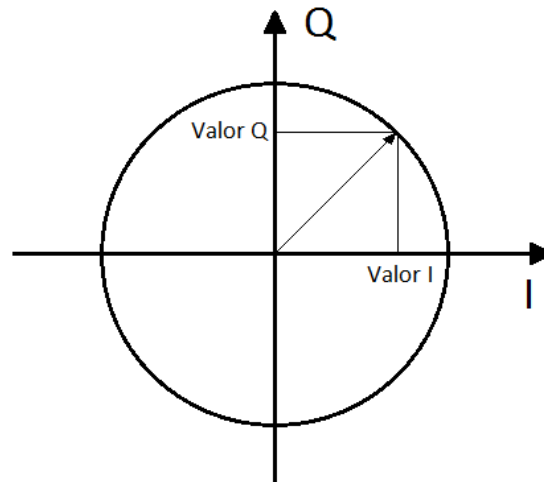


Fig.52: Constelaci3n con m3dulo y fase.

Antes se han presentado las modulaciones con dos se1ales, pero cabe mencionar que se puede realizar la modulaci3n con una cantidad mayor de se1ales portadoras haciendo las variaciones oportunas en los par3metros indicados al principio del apartado. As3, la constelaci3n para una modulaci3n de 4 se1ales ser3a:

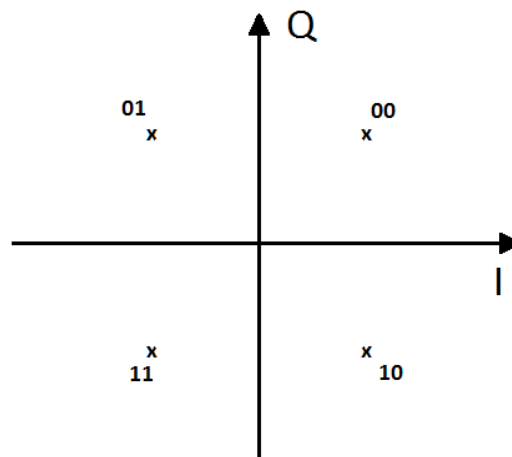


Fig.53: Constelaci3n con para modulaci3n con 4 se1ales

La interpretaci3n de los s3mbolos se realiza de la siguiente forma dependiendo de si la modulaci3n es en amplitud, fase o frecuencia:

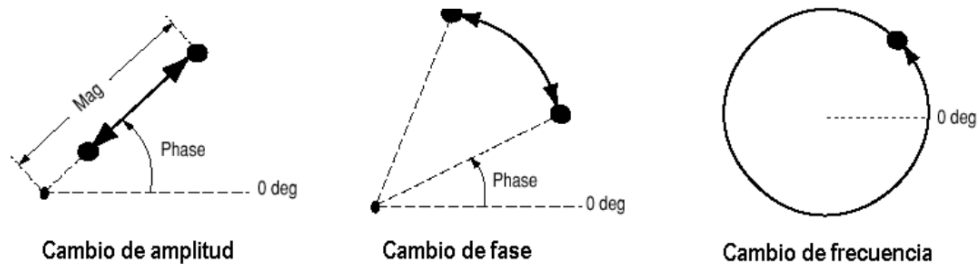


Fig.54: Detecci3n s3mbolos

El detector examina el s3mbolo recibido, que puede haber sido afectado por el ruido, distorsi3n o interferencias presentes en el canal o l3nea, lo coloca como un punto en el diagrama y realiza una estimaci3n de lo que se transmiti3 realmente asoci3ndolo al punto que se encuentre m3s pr3ximo en la constelaci3n. Por lo tanto, si la corrupci3n de la se3al es tal que lo acerca a otro punto de la constelaci3n distinto al enviado se producir3 un error y la demodulaci3n no ser3 correcta. Este esquema de detecci3n es de m3xima probabilidad.

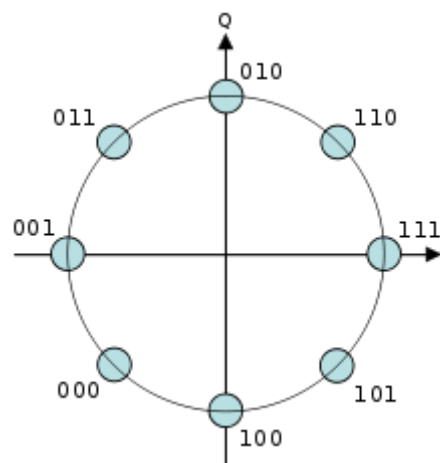


Fig.55: Ejemplo de constelaci3n 8-PSK

CAPÍTULO 3

Metodología de Diseño del Modelo para
pruebas simuladas y experimentales

En este apartado se hará una descripción de los experimentos realizados para la obtención de los resultados de la investigación.

En primera instancia se hicieron pruebas experimentales sobre una línea de potencia típica de las instaladas en un campo solar fotovoltaico inyectando una señal mediante un generador de ondas y viendo el resultado mediante osciloscopio.

Más adelante se decidió realizar el estudio del sistema mediante el enfoque “**bottom-up**” (de abajo hacia arriba), puesto que, como se comentó en apartados anteriores, es más versátil y flexible a la hora de hacer cambios en los experimentos ya que los parámetros son formulados. Cabe recordar que este enfoque consiste en introducir los modelos teóricos y requiere un mayor esfuerzo computacional pero se consigue de forma ajustada conocer la relación entre el comportamiento del circuito y el modelo de parámetros mediante un modelo matemático conocido como **función de transferencia**.

Para realizar las simulaciones se ha utilizado la herramienta software Micro-Cap SPICE de la compañía Spectrum Software que permite realizar análisis en régimen transitorio y permanente de circuitos electrónicos y eléctricos.

En las primeras simulaciones se hicieron pruebas para seleccionar la red de adaptación de la señal de información en el sistema solar fotovoltaico. Estos experimentos fueron contrastados con experimentos en el laboratorio de energía solar de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Cádiz.

Más adelante se introdujeron los modelos teóricos de la línea de potencia, así como del inversor fotovoltaico, incluyendo los estudios realizados por investigadores sobre inversores IGBT con sus valores correspondientes. Estas simulaciones se realizaron ya con el circuito experimental modelado al completo por lo que las pruebas reflejan de forma ajustada el comportamiento del sistema solar fotovoltaico como medio para transmitir señales de información. Para ello

fue necesario hacer mejoras en la red de adaptación de la señal de información, de forma específica en unos de los filtros utilizados. Más adelante se realizaron una serie de simulaciones variando la frecuencia de transmisión de la señal de información y de la longitud de la línea de potencia del campo solar fotovoltaico para conocer las limitaciones del mismo y establecer un valor válido de frecuencias para todo tipo de longitudes de línea. De esta forma, con los parámetros elegidos, se podrá diseñar como futura línea de investigación un prototipo para su aplicación en el sistema solar.

Por último se introdujo uno de los moduladores estudiados en el capítulo dos de la presente tesis. Para ello se realizó el diseño del modulador en el software utilizado (Micro-Cap SPICE) y una vez comprobado el funcionamiento del mismo mediante simulación, se introdujo en el esquema completo del montaje experimental reemplazando al generador de funciones. De esta forma concluyeron las pruebas experimentales para la caracterización de la línea de potencia con la simulación de una señal modulada mediante la transmisión y recepción de los distintos símbolos de la misma.

3.1 Adaptación señal de información a campo solar fotovoltaico

Resulta muy útil enviar datos de la tensión y corriente generados por el campo solar fotovoltaico, en particular los generados por las cadenas (o serie) de módulos a un punto remoto con el fin de monitorizar el correcto funcionamiento de las mismas. La razón de enviar la tensión y corriente producida en la cadena es la que se explicó en apartados anteriores conocido el funcionamiento de la misma. Cuando una célula deja de funcionar correctamente hace que la intensidad del resto de células asociadas en serie a la misma sea la de éste, es decir, la más restrictiva. Es aquí donde entran en funcionamiento los diodos de paso que eliminan la posibilidad de polarización inversa de dicha célula pero trae como inconveniente la exclusión de la generación del resto de células que están asociadas a la célula hasta el siguiente diodo de paso. De esta forma, cuando una cadena está generando menos tensión que las otras se debe con

alta probabilidad a este fen3meno, de ah3 que sea 3til monitorizar las cadenas o strings.

La soluci3n m3s empleada actualmente es la de usar un medio dedicado como el cable de par trenzado para la transmisi3n de la informaci3n desde la salida de las cadenas hacia el data-logger del inversor, que es un dispositivo electr3nico dise1ado para reunir valores de medici3n de diferentes par3metros. Como se ha explicado en varias ocasiones en el tema introductorio, se pretende enviar dicha informaci3n a trav3s de los mismos cables de potencia del campo solar fotovoltaico con el fin de eliminar el medio dedicado reduciendo costes y permitiendo la implantaci3n de un sistema de monitorizaci3n como el que se propone en m3ltiples instalaciones de energ3a solar fotovoltaica. A continuaci3n se muestra el esquema de medidas propuesto para el montaje experimental:

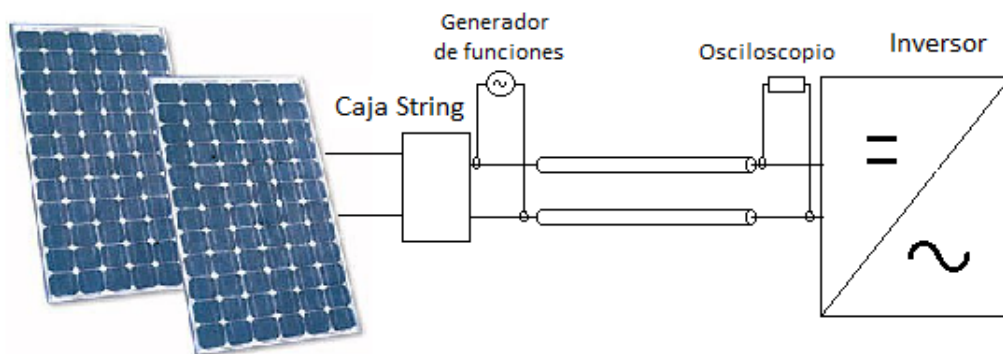


Fig.56: Esquema de medidas del montaje experimental

En la figura 56 se muestra el punto donde es inyectada la se1al de informaci3n, que para las primeras pruebas va a consistir en una onda senoidal con una cierta frecuencia. La se1al es introducida a la salida de la cadena de m3dulos fotovoltaicos y recuperada en el otro extremo de la l3nea de potencia, justo antes de la entrada al inversor. En las pruebas realizadas de campo se utiliz3 el generador de ondas para generar la se1al de entrada al circuito y el osciloscopio para realizar la medida y visualizaci3n de la se1al de prueba.

El resultado previsible de la inyecci3n de la se1al es el de una se1al senoidal que se acopla sobre la se1al de corriente continua.

3.2 Antecedentes. Primeras pruebas en la red de adaptación para la señal de información mediante filtros.

En los primeros estudios realizados el trabajo se centró en la inyección de la señal senoidal (de información) al sistema solar fotovoltaico. Para ello se realizó un primer diseño del montaje propuesto en el cual se sustituyó el modelo teórico de módulo solar fotovoltaico.

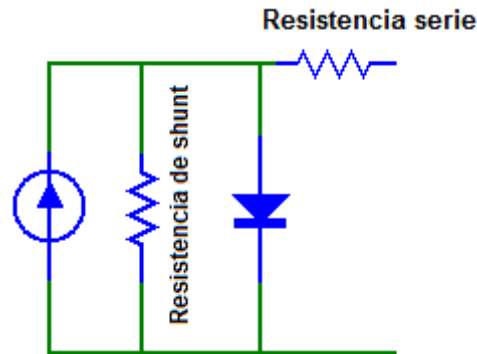


Fig. 57. Modelo teórico equivalente de módulo fotovoltaico

El mismo es aplicable a una matriz de módulos fotovoltaicos. Este modelo ya fue sometido a estudio en el apartado 2 de forma teórica. En cuanto a la línea de potencia, se consideró un trozo infinitesimal de línea con pocas pérdidas para simplificar los parámetros reactivos de la misma. Cabe mencionar que estos parámetros son despreciables cuando se transmiten señales de corriente continua como los de la señal de potencia generada, no así los resistivos. No obstante, sí que tendrán influencia en la señal de información al tratarse de una señal senoidal con una cierta frecuencia. De igual forma la caracterización exacta del inversor fue estudiada con posterioridad. Ambos modelos exactos fueron incluidos en pruebas posteriores siendo el objetivo de esta prueba inicial observar el comportamiento de los filtros para la adaptación de la señal.

El circuito propuesto para la adaptación de la señal se muestra en la figura 58.

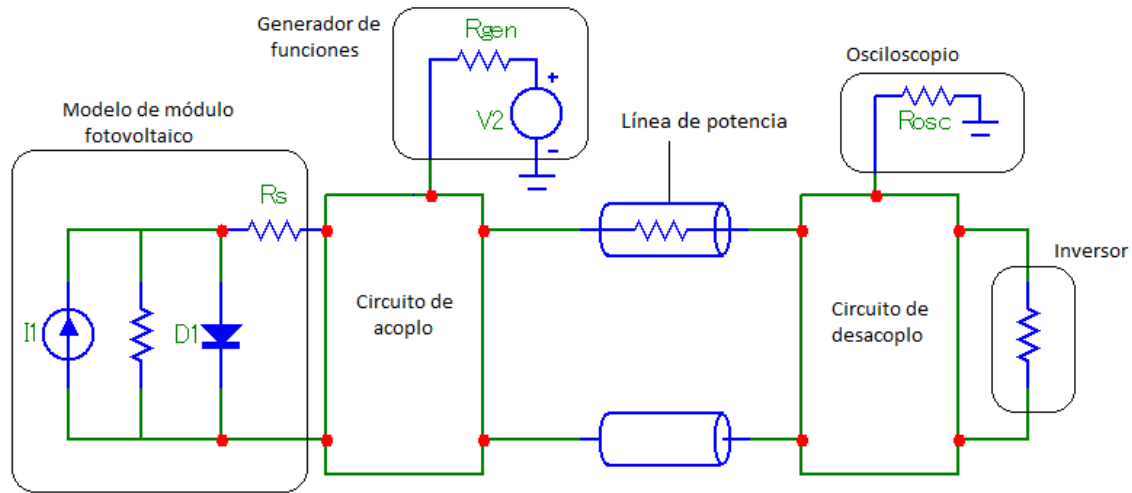


Fig. 58: Esquema del sistema propuesto con la red de adaptaci3n sin resolver

El circuito de acoplo y desacoplo de la se1al se dividi3 en dos. Por una parte es necesario colocar una red de adaptaci3n para dejar pasar la alta frecuencia, como es la se1al senoidal (de informaci3n), restringiendo el acceso de la se1al de potencia, de frecuencia cero al tratarse de una se1al continua. Por otra parte, ser3 necesario restringir el acceso de la se1al de informaci3n tanto hacia los m3dulos fotovoltaicos como hacia el inversor.

Para el primero de ellos se decidi3 colocar un filtro HP o paso alta mediante componentes reactivos que, tal y como se detall3 en el cap3tulo 2, se puede aplicar para se1ales de alta frecuencia, como lo es la se1al de informaci3n. Este filtro no es m3s que un condensador.

Filtro HP	Impedancia
	$Z_c = \frac{1}{j\omega C}$

Recordando que la impedancia de un condensador ideal es $Z_c = 1/j\omega C$ y sabiendo que la se1al de corriente generada en los m3dulos fotovoltaicos es de corriente continua, el condensador actuar3 como un circuito abierto en r3gimen permanente para la misma, puesto que la frecuencia de la se1al de corriente c3ntinua es cero, haciendo que la impedancia en el condensador sea infinita,

evitando con ello que la se1al acceda al generador. Adem1as, sabiendo que la se1al de informaci3n que se va inyectar va a ser del orden de centenares de kilohertzios, pasa a trav3s del condensador con p3rdidas de tensi3n despreciables, no afectando por tanto a la viabilidad del ensayo propuesto.

Resuelta la primera parte e incluyendo la resistencia t3pica interna que poseen los generadores de se1al (suele ser de $50\ \Omega$), el circuito queda como sigue:

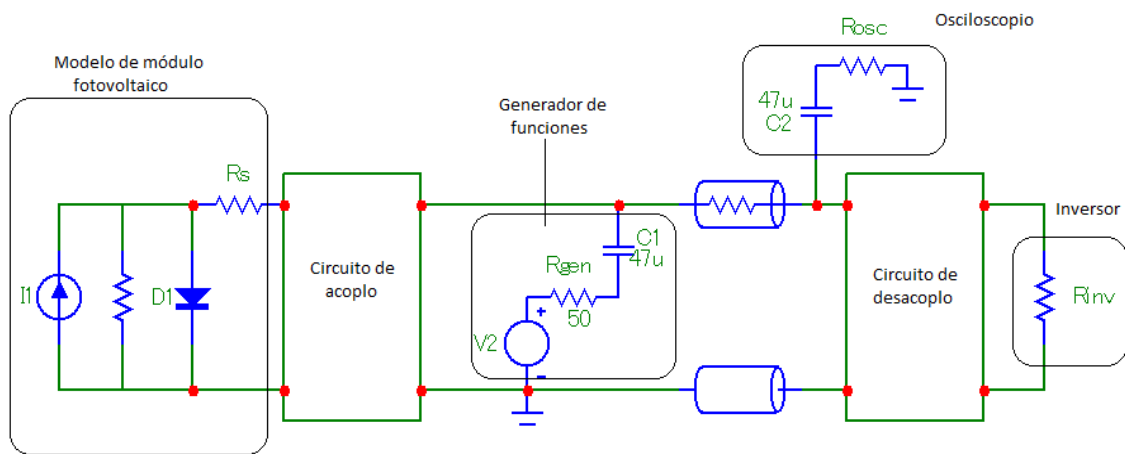


Fig. 59: Esquema del sistema propuesto con la red de adaptaci3n sin resolver

Tras la l3nea de potencia y justo antes de llegar al inversor se coloca el osciloscopio tambi3n con su correspondiente filtro paso alta para recuperar la se1al de informaci3n y observar el resultado de la transmisi3n. Al igual que con el generador, es necesario incluir en el esquema la resistencia de entrada del osciloscopio.

Para evitar que la se1al de informaci3n circule por las cadenas de m3dulos fotovoltaicos o a trav3s del inversor formando un bucle ser1 necesario colocar un filtro paso de baja o filtro LP en ambos lados. Este filtro debe dejar pasar la se1al de continua con las m3nimas p3rdidas posibles y restringir el paso a la de alterna para que 3sta vaya al osciloscopio 3nica y exclusivamente.

La primera soluci3n adoptada fue la de colocar un filtro paso de baja de primer orden mediante circuito RC en el lugar donde aparecen los circuitos de acoplo y desacoplo como se observa en la figura 60.

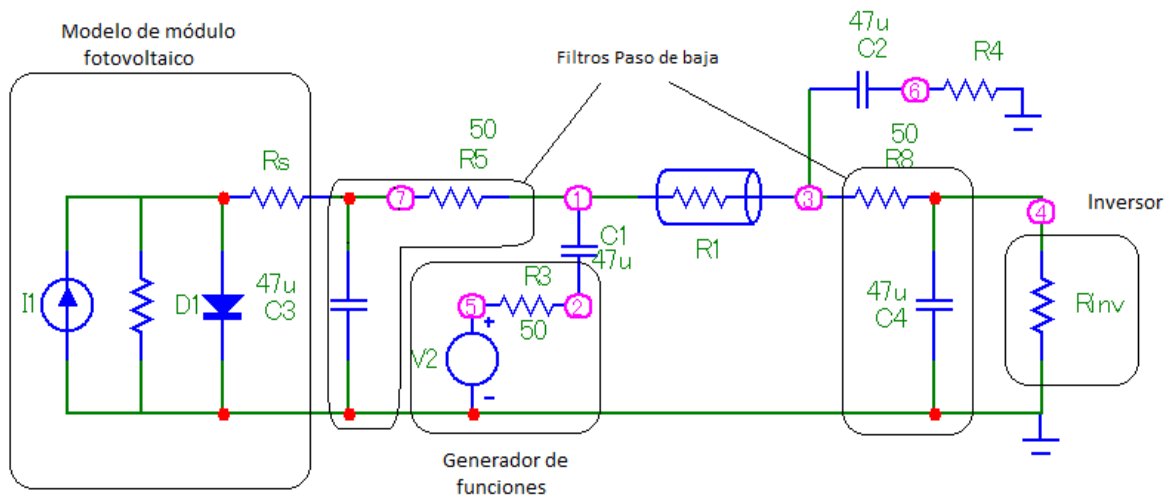


Fig.60: Esquema del sistema con filtros paso de baja

El problema de esta soluci3n es que el valor de las resistencias de los filtros son altas en comparaci3n al dise1o del circuito primario, pensado para generar corriente y, debido a las grandes intensidades que circulan por la l3nea absorber3an parte de la potencia generada por lo que se incumplir3a una premisa fundamental que es ante todo no alterar el funcionamiento del circuito. En la figura 61 se muestran las simulaciones realizadas:

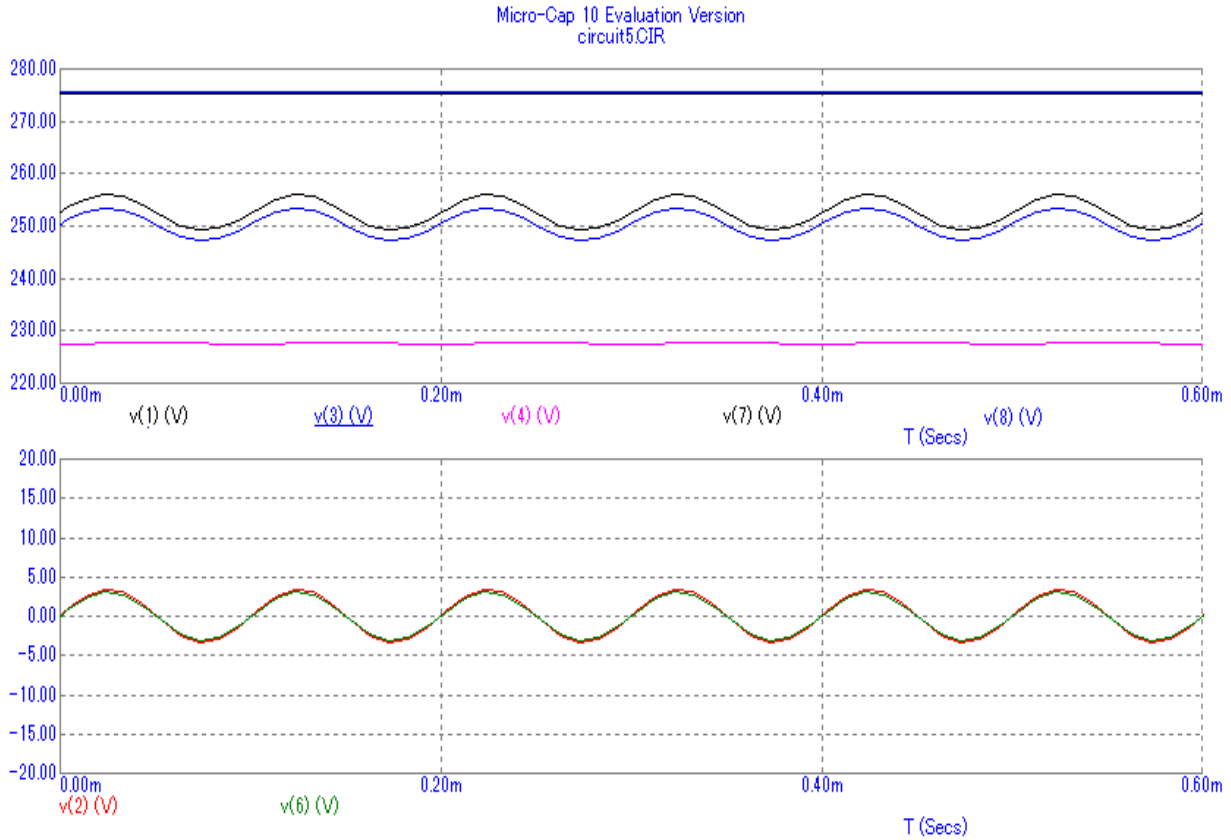


Fig. 61: Simulaci3n soluci3n con filtros pasa de baja

La se1al v(2) mostrada en la gr1fica inferior de color rojo, se corresponde con la se1al de informaci3n generada en el generador de funciones. Muy pr3xima a la misma y en la misma gr1fica se muestra la se1al v(6) de color verde, la cual se corresponde con la se1al medida en el osciloscopio. Haciendo una ampliaci3n de la gr1fica inferior, es posible apreciar en la figura 62 como v(6), es de menor amplitud que la se1al original, v(2), debido a la p3rdida en ganancia causada por la impedancia de la l3nea de transmisi3n.

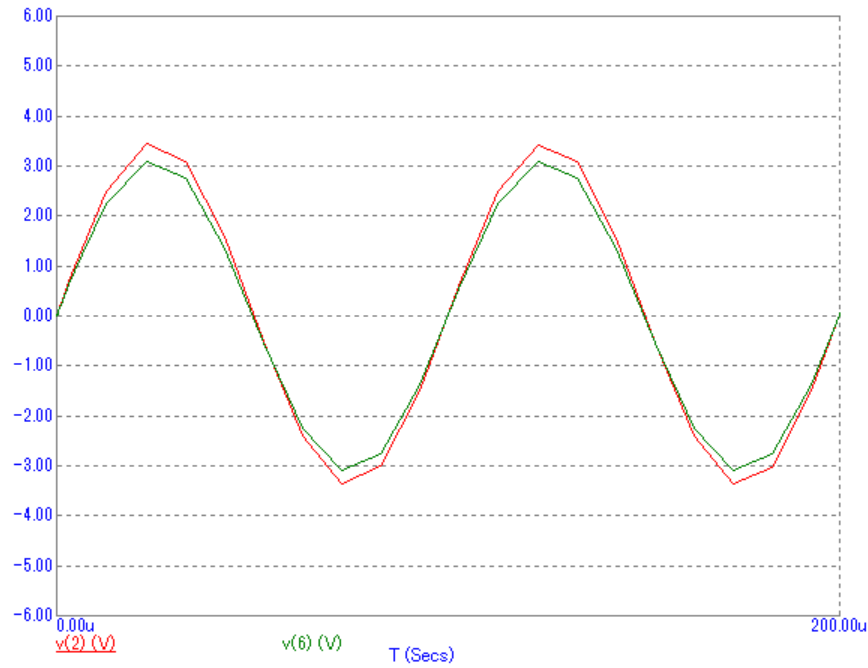
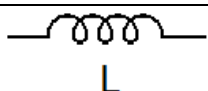


Fig. 62: Ampliación de la señal generada en el generador (rojo) y medida en el osciloscopio (verde)

Como ya se explicó, se observa en la figura 62 que la señal de potencia generada en la matriz de módulos fotovoltaicos, en la gráfica superior $v(8)$ (primera señal de la gráfica superior), de 275,67V sufre una pérdida importante de potencia con respecto a la señal que llega al inversor, $v(4)$, por lo que esta solución no es viable. En consecuencia, se obtiene como conclusión que cualquier solución que conlleve una resistencia en serie a la matriz de módulos puede llegar a ser muy sensible y empeorar el funcionamiento para el cual el sistema se dise n , perdiendo rendimiento energético y generando una fuente de calor en esa resistencia.

La segunda opción y que a la postre fue la definitiva, evitando con ello tener que dise nar filtros de mayor orden, fue la de incorporar un filtro paso de baja mediante un componente reactivo como es la bobina con un valor bajo de choque.

Filtro LP	Impedancia
	$Z_L = j\omega L$

El resultado final es el presentado en la figura 63, la cual incluye los filtros paso de baja y paso alta finales utilizados para conseguir el objetivo.

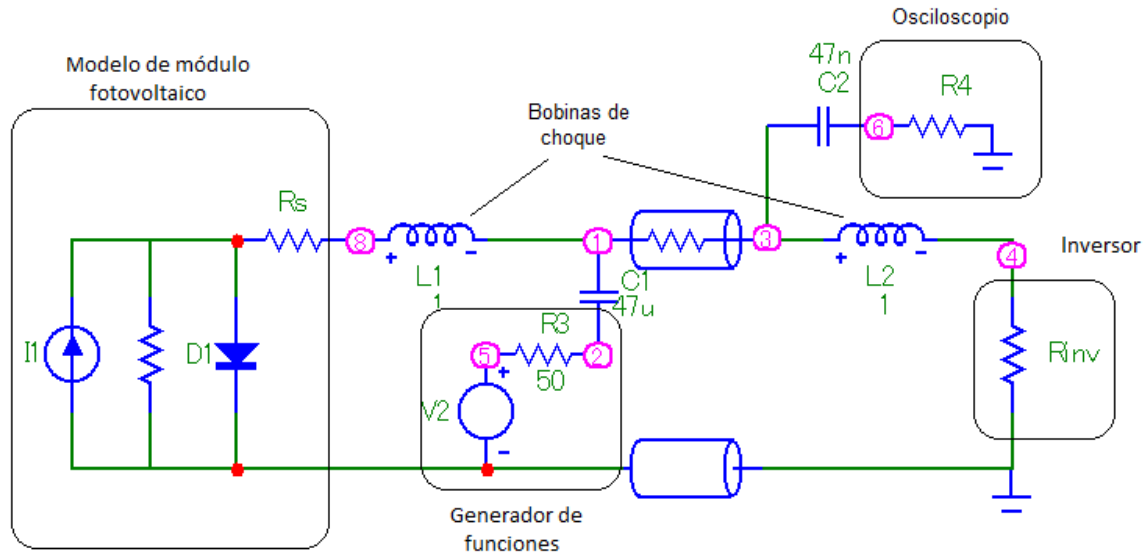


Fig. 63: Esquema del sistema con bobinas de choque

Las bobinas de choque se instalan para impedir que pase la se3al de alterna y s3 la de continua. Como la impedancia de una bobina ideal es $Z_L = j\omega L$ henrios, la se3al de continua procedente de los m3dulos pasa sin problemas, puesto que al ser de frecuencia nula, la bobina restringe el paso de la se3al de informaci3n comport3ndose como un circuito abierto, por lo que toma el camino de menor resistencia, en este caso el de la l3nea de potencia al inversor. En la figura 64, se muestra la simulaci3n correspondiente a este circuito:

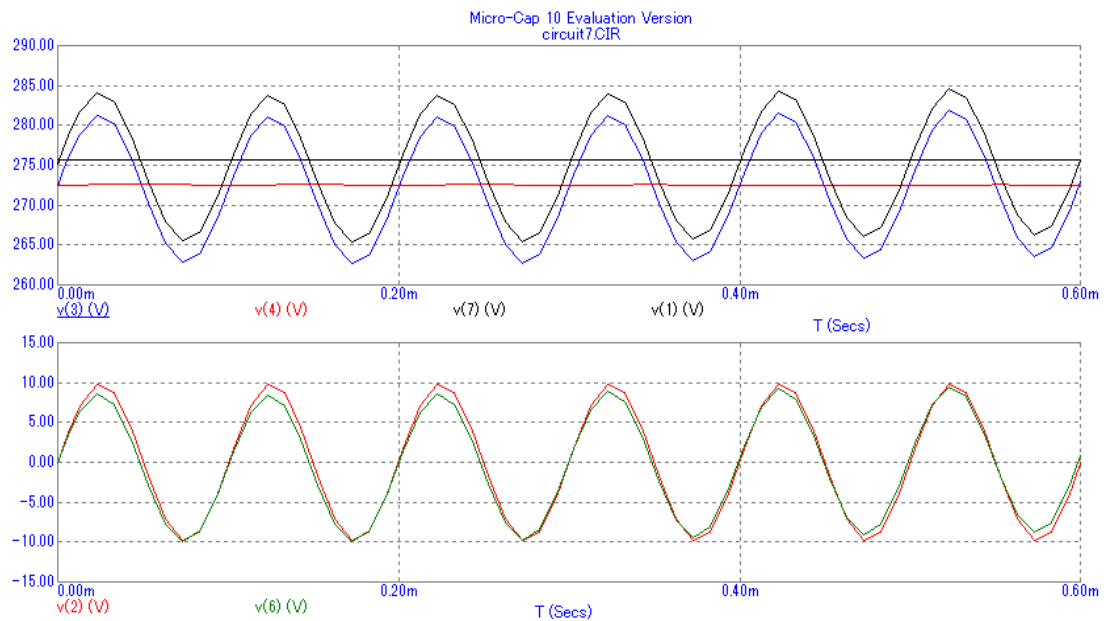


Fig. 64: Simulaci3n soluci3n con bobinas de choque

Se observa en la gr3fica inferior c3mo la se3al generada en el generador de funciones, se3al de tensi3n $v(2)$, es recuperada en el osciloscopio, resultando la se3al de tensi3n $v(6)$ con una cierta p3rdida de amplitud debido a los efectos resistivos de la l3nea. Por otra parte, la se3al generada en la matriz de m3dulos $v(7)$ llega al inversor $v(4)$ sufriendo una peque3a disipaci3n debido a la impedancia de la l3nea de transmisi3n, la cual depende de la secci3n de la l3nea y la longitud de la misma. Para llegar a esta soluci3n, fue necesario bajar el valor de los condensadores. El inconveniente de esta soluci3n es que la bobina es de un valor bastante alto, por lo que el tama3o de 3stas resulta ser considerable.

3.2.1 Validaci3n experimental instalaciones del Laboratorio de Energ3a Solar.

En los ensayos experimentales realizados se ha considerado el caso de un sistema solar fotovoltaico con 4 cadenas de 3 m3dulos cada una, las cuales se conectan en paralelo a una sola caja string. Este sistema piloto se encuentra actualmente en funcionamiento en instalaciones del Laboratorio de Energ3a Solar de la Universidad de C3diz.

Para poder realizar los ensayos se utilizaron equipos apropiados y con niveles de protección adecuados a los valores eléctricos presentes en el sistema. En ellos hay que tener en cuenta las impedancias introducidas por los mismos en el circuito.

El osciloscopio utilizado admite una tensión máxima de entrada con sonda de 3kV, por lo que es capaz de medir las tensiones que recorren el sistema, no así el generador, que está pensado para generar datos y no para recibirlos. Así pues, tensiones de 300V aproximadamente, como los que se generan en el campo solar utilizado en la práctica, puede ser crítico para él. Además de esto, se debe intentar afectar lo mínimo posible a la señal de potencia generada, de tal forma que la intervención realizada para conseguir la transmisión de la señal de información no afecte, o lo haga muy débilmente, al funcionamiento con cuyo principal propósito se había implementado el sistema.

El equipo utilizado para realizar la validación del estudio simulado en un campo solar fotovoltaico fue el siguiente:

Generador de funciones Hameg 8130:

El generador de funciones es un aparato que permite generar ondas periódicas de carácter rectangular, senoidal, triangular y de pulsos además de señales arbitrarias y en la cual es posible ajustar la frecuencia de la señal a nuestro antojo. El generador que se utiliza en los ensayos experimentales es el HAMEG 8130, el cual es capaz de generar señales con margen de frecuencia desde 10mHz hasta los 10MHz, observables a través de un display (pantalla con indicador numérico) de 5 dígitos.



Fig.65: Generador de funciones Hameg 8130

La tensi3n de salida m3s elevada es, para todos los modos de se3al, en circuito abierto de 20 Vpp. Hay que tener en cuenta que el generador tiene una resistencia terminal de 50Ω.

Osciloscopio



Fig. 66 Osciloscopio Fluke 97 50 MHz ScopeMeter

Las medidas se van a realizar con el osciloscopio port3til Fluke 97 50 MHz ScopeMeter, el cual es bastante manejable debido a su tama3o y se puede usar con bater3a o conectado a la red. Dicho osciloscopio tiene la capacidad de realizar un seguimiento de forma continua de se3ales de entrada desde 15 Hz hasta 50MHz y posee la opci3n de seleccionar autom3ticamente la base de tiempos, el rango de medidas y el nivel de disparo correctos en tres segundos con la funci3n Auto Set. Ser3 de gran utilidad en futuros experimentos para hallar la frecuencia de corte a la cual se puede transmitir informaci3n por las l3neas de DC ya que posee la funci3n de respuesta en frecuencia a -3dB. Posee una impedancia de entrada mediante los cables de entrada directa de 1MΩ/25pF y mediante sonda de 10MΩ/15pF, impedancias de entrada bastante alta, como es normal en este tipo de aparatos para poder capturar las se3ales con la menor p3rdida en ganancia posible.

Planta solar fotovoltaico de los ensayos de campo

El sistema en el que se han realizado los ensayos experimentales consta de un 1 kWp de potencia aproximadamente de m3dulos de silicio amorfo GADIR 85Wp.



Fig. 67: Matriz de m3dulos fotovoltaicos de Silicio amorfo

Las salidas de cada cadena van conectadas al positivo y al negativo correspondiente de una misma caja string. La caja String tiene como salidas dos cables 3RNFLEX SOLAR XLS de 4 mm de secci3n, uno positivo y otro negativo de retorno del inversor.



Fig. 68: Caja string

En la imagen (figura 68) se muestran los 4 cables positivos, cada uno de una cadena, en la parte inferior derecha, as3 como los cuatro negativos en la parte inferior izquierda. En la parte superior aparecen los cables de salida, uno positivo y otro negativo que como se puede apreciar son de mayor secci3n que los anteriores.

El inversor utilizado para realizar la conversi3n de DC a AC es un SMA SUNNY BOY 1100, como el que se muestra en la figura 69:



Fig. 69: Inversor Sunny Boy 1100, cerrado (izquierda), abierto (derecha).

Este inversor est3 dise1ado para realizar la conversi3n de 1KWp de potencia pico. Soporta a la entrada una se1al de continua de 1210 Wp como m3ximo, cumpliendo con los m3rgenes establecidos para este tipo de sistemas. Por otra parte es capaz de proveer a la red una se1al m3xima de 1100 Wp de alterna. En la imagen derecha se observa el inversor ya desmontado en nuestro laboratorio con dos cocodrilos procedentes del osciloscopio port3til. Cabe destacar que la apertura, manipulaci3n del equipo y captura de datos se han realizado siguiendo los protocolos de seguridad necesarios para manipular equipos en los que circulan altas corrientes.

En el lado de la caja string se coloca el generador de funciones con el condensador en serie, necesario para proteger el equipo, cuya capacidad de almacenamiento es de hasta 400 V, dato muy a tener en cuenta a la hora de manipularlo, puesto que al conectarlo al sistema solar fotovoltaico el condensador se queda cargado con una tensión alta por lo que es importante realizar una descarga o esperar un cierto tiempo a que se descargue, sólo para evitar accidentes.



Fig. 70: Generador de funciones con caja string para su posterior conexión.

En él se programa la señal de información con una amplitud de 10V pico a pico y frecuencia de 10 kHz.

A la hora de realizar las pruebas surgieron dos problemas que hubo que resolver. El primero fue que el generador de señales estaba conectado a tierra a través del cable de potencia (el enchufe) del mismo y al realizar las primeras medidas, el dispositivo de seguridad del inversor daba un fallo de inversor a tierra. Para solucionarlo, se anuló la tierra del enchufe del generador con una cinta aislante para evitar que introdujera una tierra añadida.

El segundo inconveniente que se presentó fue el de no considerar la resistencia interna de la sonda del generador, la cual era de valor muy alto y cambiaba por completo el funcionamiento estudiado previamente en las simulaciones. Para solucionarlo se usó un cable coaxial como sonda, cuya resistencia es despreciable, para proveer la señal de información como se observa en la imagen inferior derecha de la figura 70.

La se1al fue recuperada en el otro extremo, aunque se apreci3 una atenuaci3n no despreciable. Dichas p3rdidas fueron causadas por los factores ya comentados y en gran parte se pueden atribuir tambi3n al mal acoplamiento de la sonda en el circuito.

3.3 Simulaciones esquema completo

En este apartado ya se incluyeron tanto el **modelo de l3nea de potencia** como el **modelo de inversor fotovoltaico**. Recordando lo comentado en el cap3tulo dos, las l3neas de potencia como las encontradas en un campo solar fotovoltaico se pueden modelar mediante su equivalente circuito en PI o en T. En este caso el modelo incluido es el segundo de ellos y sabiendo que es sim3trico el resultado es el siguiente:

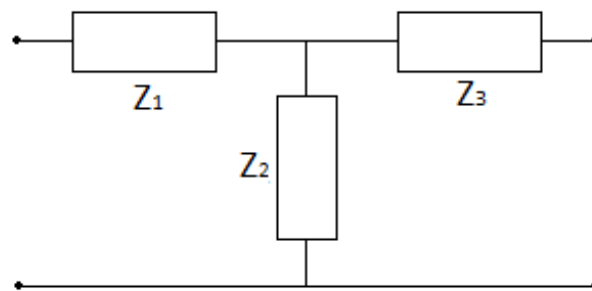


Fig.71: Circuito equivalente en T de una l3nea de potencia

Falta por determinar los valores de reactancia inductiva y capacitiva para la obtenci3n de los par3metros R, L, C y G que, como ya se coment3 en su momento, vendr3n determinadas por la ley de Faraday a trav3s de las soluciones de la ecuaci3n de Maxwell que depende de la geometr3a de la l3nea de transmisi3n.

El otro modelo es el del inversor de onda senoidal, extra3do de diversos estudios y en particular con los valores del estudio de Konat3 [39] sobre el inversor IGBT donde:

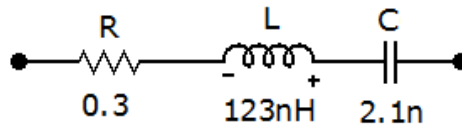


Fig. 72: Modelo de inversor en circuito abierto

Las pruebas realizadas sobre el esquema con todos los modelos caracterizados dictaban la necesidad de realizar una mejora en los filtros paso de baja utilizados. Esto fue debido a que el utilizado requería la necesidad de unas bobinas de valor muy alto y por tanto de importante tama1o. As3 pues, se hizo el estudio para introducir filtros de segundo orden no resistivos para no influir en la se1al de potencia. Se escogi3 un filtro paso baja tipo k o de k-constante consistente en un bipuerto compuesto por una bobina (que es lo que se ten3a anteriormente) y un condensador tal y como se muestra en la figura 73:

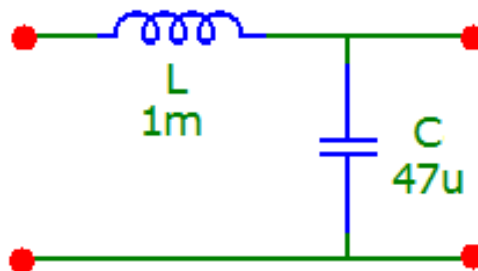


Fig.73: Filtro paso baja tipo k

La frecuencia de corte viene dada por: $\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. A frecuencias menores a 3sta, el filtro deja pasar la se1al con la misma amplitud.

Los valores mostrados son los utilizados en la configuraci3n definitiva del mismo puesto que la frecuencia de corte es inferior a la frecuencia de la se1al de informaci3n y los efectos en 3sta son m3nimos.

A continuaci3n (figura 74), se muestra el esquema final del montaje experimental con los modelos equivalentes de cada uno de los componentes del circuito:

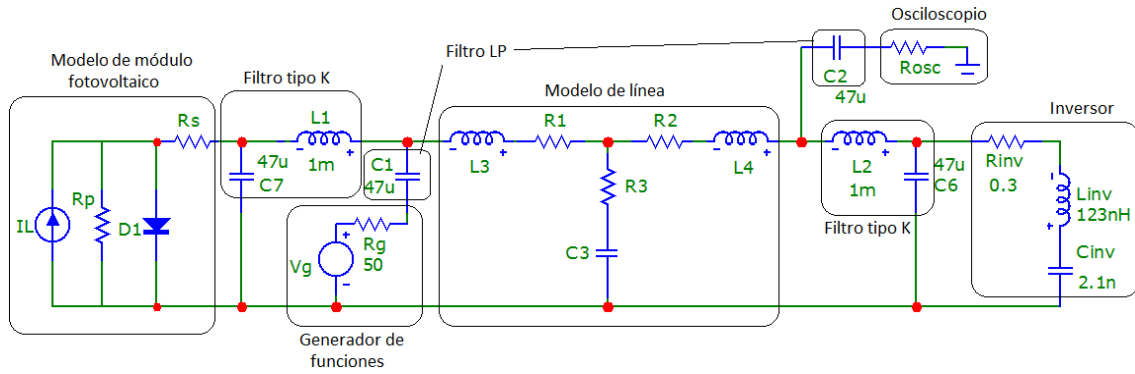


Fig.74: Modelo esquema completo para la simulaci3n.

La resistencia de la l3nea la suministra el fabricante. Se ha tomado como referencia el cable modelo Exzhellent Solar de secci3n 1x35 mm². El radio interior del mismo es de 3.34 mm y posee una resistencia de $R = 0.565 \cdot 10^{-3} (\Omega/m)$. Las caracter3sticas del cable se muestran en la tabla siguiente (Fig. 75):

Code	Secci3n transversal	Color	Di3metro exterior	Peso	Radio de curvatura m3n.	M3xima Resist. conductor a 20°C	M3x. corriente en aire	Ca3da de tensi3n en DC
	mm ²		mm ²	kg/km	mm ²	Ω/km	A	V/A.km
1614111	1x16	■ ■	8,8	200	35	1,24	132	3,455
1614112	1x25	■ ■	10,5	295	42	0,795	176	2,215
1614113	1x35	■ ■	11,8	395	47	0,565	218	1,574

Fig.75: Cable seleccionado.

Recordando que la capacitancia y la inductancia se calculan de la siguiente forma:

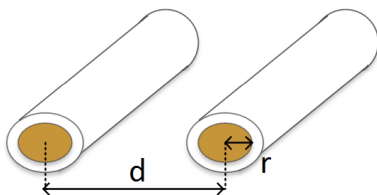


Fig.76: Secci3n de los dos conductores

$$L = 4 \cdot \ln\left(\frac{d}{r}\right) \cdot 10^{-7} \quad (H/m)$$

$$C = \frac{1}{18 \ln\left(\frac{d}{r}\right)} \cdot 10^{-10} \quad (F/m)$$

Se ha supuesto una separaci3n de los conductores que van desde la caja String al inversor de $d=20$ mm, por lo que se obtiene un valor de:

$$C = 3,104 \cdot 10^{-12} (F/m)$$

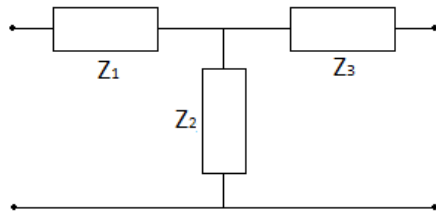
$$L = 7,159 \cdot 10^{-7} \text{ (F/m)}$$

Con estos dos valores ya se pueden calcular la impedancia intr3nseca del medio y la constante de propagaci3n. Para ello, cabe mencionar que las p3rdidas por conductancia son despreciables en comparaci3n a las que tienen lugar en los conductores, por lo que G se desprecia y ser3 necesario establecer la frecuencia de la se3al de informaci3n inyectada al medio. Tomando la frecuencia como $f=100\text{kHz}$:

$$Z_0 \cong \sqrt{\frac{L}{C}} = 480.24$$

$$\gamma_0 \cong j\omega\sqrt{LC} + \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2}\sqrt{\frac{L}{C}} = 5,88 \cdot 10^{-7} + j9,366 \cdot 10^{-4}$$

Una vez obtenidas las caracter3sticas de propagaci3n de la l3nea se pueden calcular los par3metros concentrados del circuito equivalente en T (ver Fig. 77)



$$Z_1 = Z_3 = \frac{Z_0}{\sinh \gamma_0 l} (\cosh \gamma_0 l - 1)$$

$$Z_2 = \frac{Z_0}{\sinh \gamma_0 l}$$

Fig. 77: Circuito equivalente en T

El resultado de estas ecuaciones ser3 un n3mero complejo por lo que ser3 importante desarrollarlas para dejar el resultado en t3rminos de la parte real y la imaginaria con el fin de que puedan coincidir directamente con los par3metros R , G , L y C . Para ello se va a aplicar algunas de las relaciones entre funciones hiperb3licas:

$$\sinh \gamma_0 l = \sinh(\alpha l + j\beta l) = \sinh(\alpha l)\cos(\beta l) + j\cosh(\alpha l)\sin(\beta l)$$

$$\cosh \gamma_0 l = \cosh(\alpha l + j\beta l) = \cosh(\alpha l)\cos(\beta l) + j\sinh(\alpha l)\sin(\beta l)$$

$$Z_2 = \frac{Z_0}{\sinh \gamma_0 l} = \frac{Z_0}{\sinh(\alpha l) \cos(\beta l) + j \cosh(\alpha l) \sin(\beta l)} \cdot \frac{\sinh(\alpha l) \cos(\beta l) - j \cosh(\alpha l) \sin(\beta l)}{\sinh(\alpha l) \cos(\beta l) - j \cosh(\alpha l) \sin(\beta l)} =$$

$$\frac{Z_0 (\sinh(\alpha l) \cos(\beta l))}{\sinh^2(\alpha l) \cos^2(\beta l) + \cosh^2(\alpha l) \sin^2(\beta l)} - j \frac{Z_0 (\cosh(\alpha l) \sin(\beta l))}{\sinh^2(\alpha l) \cos^2(\beta l) + \cosh^2(\alpha l) \sin^2(\beta l)}$$

De forma an3loga a la anterior se obtiene:

$$Z_1 = Z_3 = \frac{Z_0}{\sinh \gamma_0 l} (\cosh \gamma_0 l - 1) =$$

$$= \frac{Z_0 (\sinh(\alpha l) \cosh(\alpha l) - \sinh(\alpha l) \cos(\beta l))}{\sinh^2(\alpha l) \cos^2(\beta l) + \cosh^2(\alpha l) \sin^2(\beta l)} + j \frac{Z_0 (\cosh(\alpha l) \sin(\beta l) - \sin(\beta l) \cos(\beta l))}{\sinh^2(\alpha l) \cos^2(\beta l) + \cosh^2(\alpha l) \sin^2(\beta l)}$$

Como se puede observar, las impedancias dependen de la longitud de la l3nea. Sustituyendo los valores de Z_0 y γ_0 se obtienen valores de impedancias distintas en el circuito equivalente en T (Fig. 78) seg3n la longitud de la l3nea existente en la instalaci3n. Se podr3a considerar una instalaci3n con una l3nea de $l = 100m$, con lo que sustituyendo se obtienen los siguientes valores:

$$Z_1 = Z_3 = 0,0141 + 22,51j$$

$$Z_2 = 3,215 - 5134,79j$$

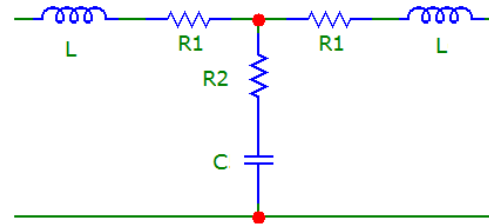


Fig.78: Modelo en T con los componentes correspondientes

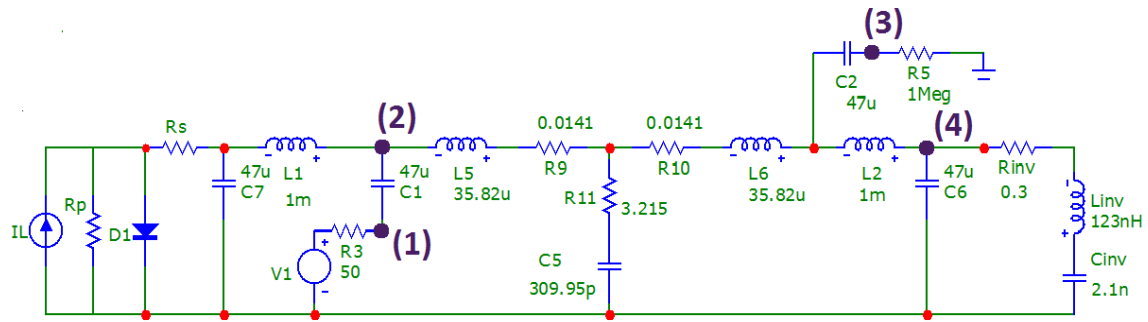
De las ecuaciones anteriores se obtienen los valores de los componentes:

$$X_L = j\omega L \rightarrow L = \frac{39j}{2\pi 10^5 j} = 35,82 \mu H$$

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} \rightarrow C = \frac{1}{2\pi 10^5 \cdot 8896,97} = 309,95 pF$$

$$R_1 = 0,0141 \Omega \text{ y } R_2 = 3,215 \Omega$$

A continuaci3n se muestra, en la figura 79, el resultado de la simulaci3n y el esquema con los nodos representados en la misma para los valores seleccionados anteriormente, esto es, para un radio de conductores de $r = 3,34 mm$, resistencia $R = 0,565 \cdot 10^{-3} (\Omega/m)$, distancia entre conductores $D = 20mm$, frecuencia de trnasmisi3n $f = 100kHz$ y longitud de l3nea $l = 100m$:



P3g.79: Esquema con nodos simulados del circuito para $f=100\text{kHz}$ y $l=100\text{m}$.

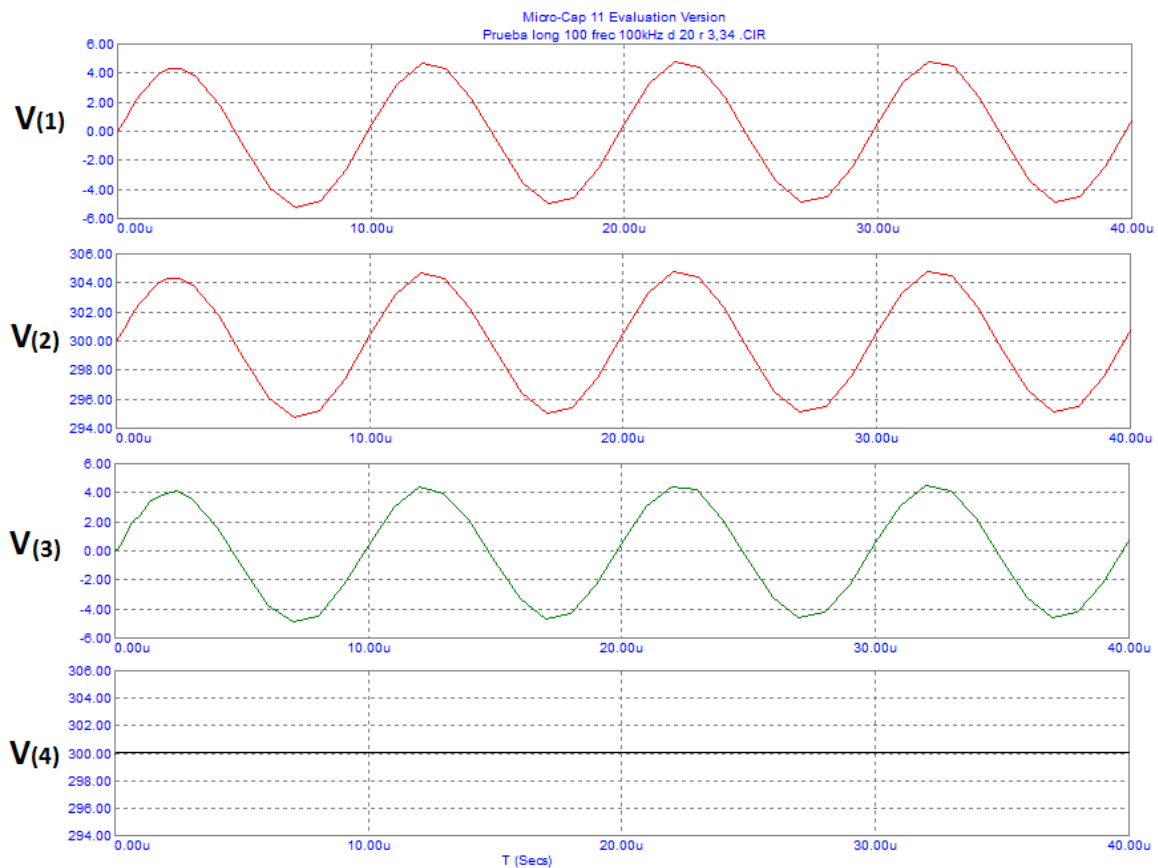


Fig.80: Simulaci3n del circuito $f=100\text{kHz}$ y $l=100\text{m}$

En la gr3fica (figura 80) se observa $V_{(1)}$ que corresponde a la se3al generada de informaci3n en el punto (1) del esquema. En el punto (2) la se3al de informaci3n y la se3al generada de potencia se mezclan dando como resultado $V_{(2)}$, que corresponde a una se3al senoidal con la frecuencia de la se3al de informaci3n viajando sobre el nivel de continua de la se3al generada en los m3dulos. $V_{(3)}$ es la se3al de informaci3n extra3ida del sistema justa antes de llegar al inversor (punto (3)), la cual se recibe con una ligera atenuaci3n tras su paso por los 100 metros de l3nea de potencia. Por 3ltimo, se muestra $V_{(4)}$ que

corresponde a la se1al de potencia llegando al inversor, en el punto (4), sin sufrir efectos adversos apreciables, puesto que la atenuaci3n no llega a la decena de unidad. En la figura 81 se observa de forma ampliada la se1al de informaci3n en el momento de la transmisi3n frente a la misma en la recepci3n.

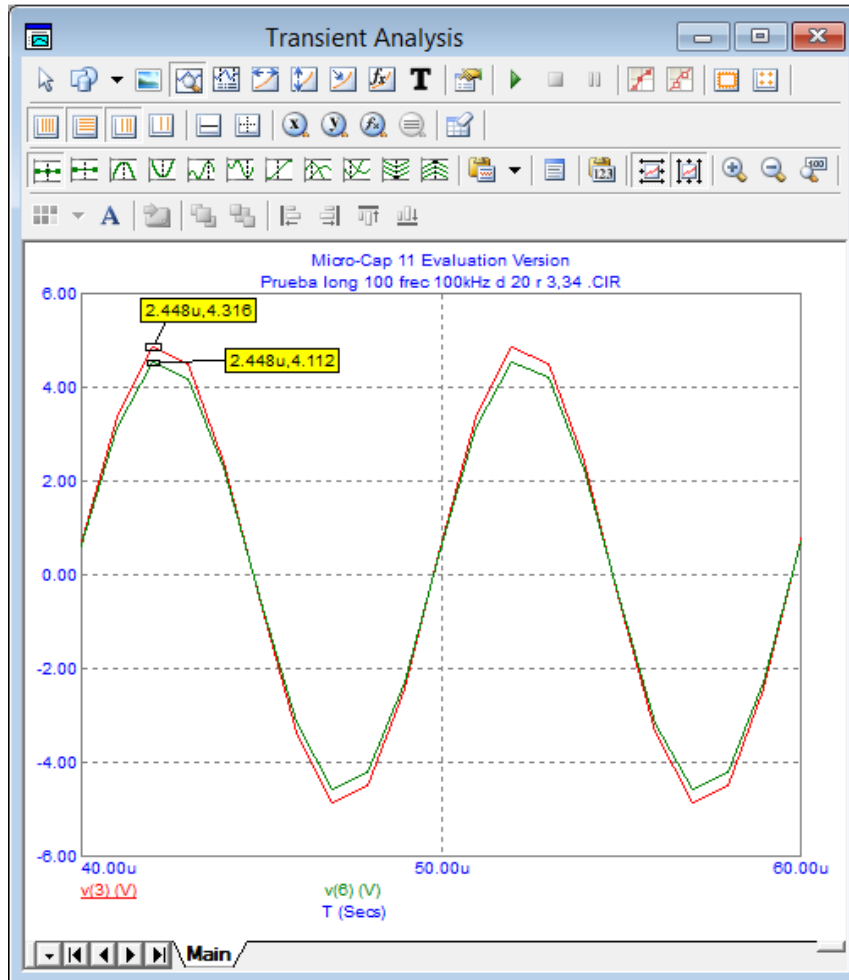


Fig.81: Se1al de informaci3n transmitida frente a recibida

En rojo (v3) se muestra la se1al generada antes de entrar al sistema d3lar fotovoltaico y en verde (v7) se representa la se1al ya extra3da. Observando los valores pico de ambas (4,316 para la primera y 4,112 para la segunda) se obtiene una atenuaci3n aproximada del 4,73% $(4,316 - 4,112 / 4,316 \times 100)$ la cual corresponde casi en su totalidad al producido por su paso por la l3nea, por lo que las causas por la red de adaptaci3n no son apreciables.

Para poder cambiar las variables con facilidad y obtener el c3lculo de los par3metros del circuito equivalente en T de forma directa se ha desarrollado una

hoja excel para que realice los c3lculos de forma autom3tica (Fig. 82). 3nicamente es necesario introducir resistencia en Ω/m , radio del conductor y distancia entre los centros de los conductores en id3ntica magnitud, frecuencia en herzios y longitud de l3nea en metros y la hoja devuelve todos los valores necesarios para la simulaci3n:

Resistencia (Ω/m)	0,000565	Z_0	480,243396		
radio conductor (mm)	3,34	$\alpha=\text{Re}(\gamma_0)$	5,8824E-07		
Distancia entre conductores (mm)	20	$\beta=\text{Im}(\gamma_0)$	0,00093664		
Frecuencia transmisi3n (Hz)	100000			Bobinas	3,5821E-05
Longitud de l3nea (m)	100	$\text{Re}(Z1)=\text{Re}(Z3)$	0,01415602	R1=R3	0,01415602
		$\text{Im}(Z1)=\text{Im}(Z3)$	22,5072629	R2	3,21538978
				Condensador	3,0995E-10
Inductancia (H/m)	7,15905E-07	$\text{Re}(Z2)$	3,21538978		
Capacitancia (F/m)	3,10408E-12	$\text{Im}(Z2)$	-5134,79151		

Fig.82: Hoja de c3lculo de par3metros

Dado que la configuraci3n del sistema anterior es v3lido para la configuraci3n elegida, se va a probar en l3neas de menor y mayor longitud para comprobar su adaptaci3n a cualquier sistema solar fotovoltaico independientemente de su tama1o.

$l = 20\text{m}$: Para instalaciones peque1as como las encontradas en viviendas particulares o locales la adaptaci3n cumple tanto y mejor que en las pruebas anteriores como se observa en la figura 83.

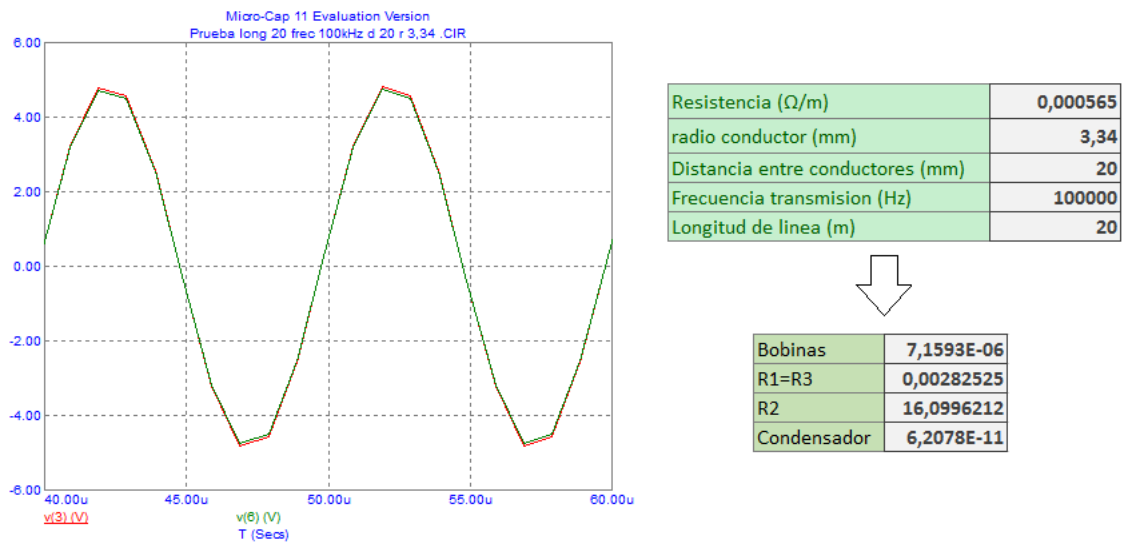


Fig.83: Simulaci3n y valores de los par3metros y componentes para una l3nea de 20m.

$l = 500m$: Para campos solares de gran capacidad la configuraci3n sigue siendo v3lida. En esta ocasi3n se puede apreciar una atenuaci3n un poco mayor, pero ni mucho menos cr3tica para impedir la comunicaci3n. Cabe mencionar que para longitudes de este orden con corrientes m3s altas se pueden usar cables de mayor secci3n por lo que la atenuaci3n ser3a a3n menor.

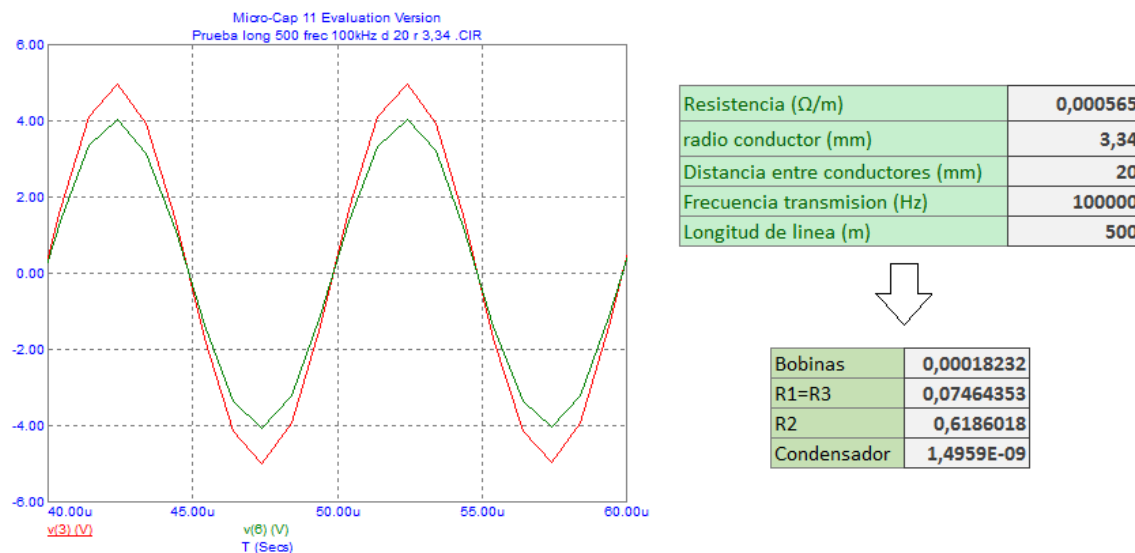


Fig.84: Simulaci3n y valores de los par3metros y componentes para una l3nea de 500m.

Comprobado el funcionamiento del sistema, se puede afirmar que es posible desarrollar un prototipo con los componentes y par3metros como los elegidos en esta secci3n para realizar la comunicaci3n. 3nicamente quedar3a incluir alguno de los demoduladores vistos en el cap3tulo dos, lo cual se realizar3a en la siguiente secci3n.

3.4 Simulaci3n introduciendo un modulador PSK.

En el presente apartado se muestran los resultados de una simulaci3n del esquema experimental introduciendo alguno de los moduladores por desplazamiento vistos en el cap3tulo 2. De todos ellos, el m3s propicio parece ser el modulador de desplazamiento por fase o PSK (Phase Shift Keying), dado que es posible mantener la misma frecuencia ya probada en el montaje experimental, frente al desplazamiento de frecuencia o FSK (Frequency Shift Keying) que requiere del conocimiento de, al menos, dos frecuencias (una para

cada símbolo) y del valor de ASK (desplazamiento en amplitud) dado a la ausencia de uno de los dos símbolos de amplitud pudiendo confundirse el cero con la ausencia de información.

Por otra parte, sí se puede realizar una simulación ajustada del funcionamiento del sistema con el modulador PSK mientras que con el FSK, al cambiar la frecuencia en cada uno de los dos símbolos, cambiarían los parámetros concentrados del modelo de línea. Así pues sería necesario hacer una aproximación escogiendo un valor medio entre las frecuencias para calcular los parámetros por lo que se estaría perdiendo efectividad en la simulación.

El esquema del sistema introduciendo el modulador sería el representado en la figura 85.

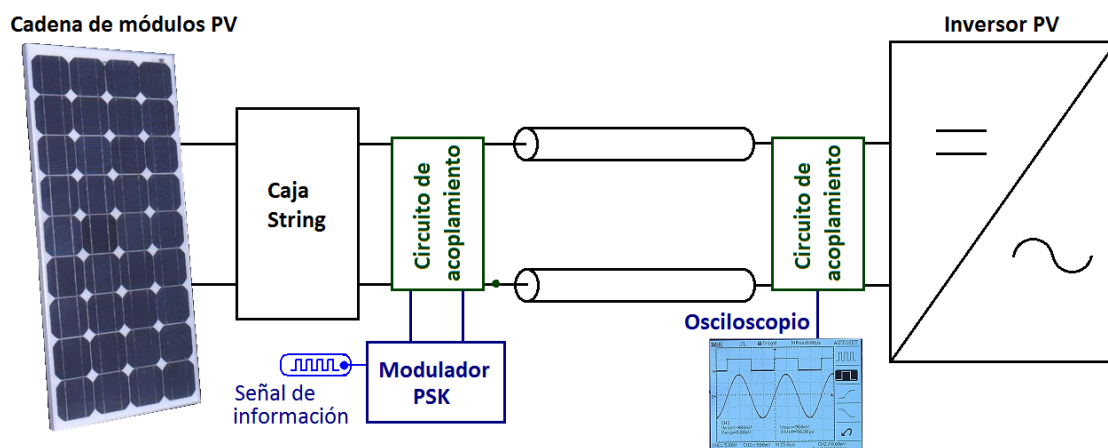


Fig.85: Esquema del sistema con el modulador

Se ha diseñado en el programa de simulación el modulador PSK, que está compuesto por una señal portadora a la frecuencia utilizada en las pruebas finales (100kHz) y una señal moduladora de pulsos cuadrados asociados a los 1's y 0's de la señal de información binaria, las cuales se mezclan mediante la multiplicación de ambas para obtener la señal PSK. El esquema se presenta en la figura. 86:

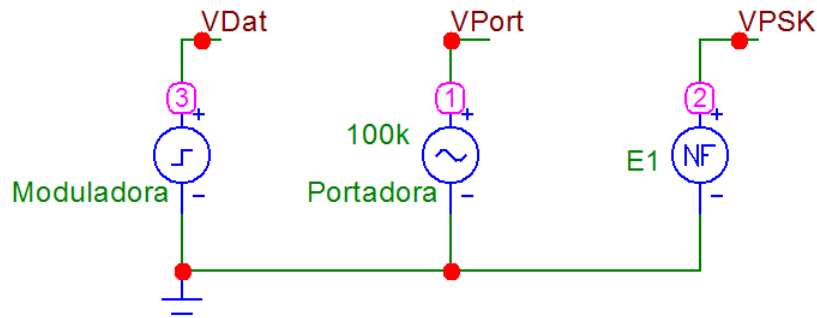


Fig.86: Esquema modulador PSK en simulador Micro-Cap SPICE

En la figura 87 se presenta el resultado de la simulaci3n para una se1al aleatoria de datos y la frecuencia de portadora especificada anteriormente de 100kHz:

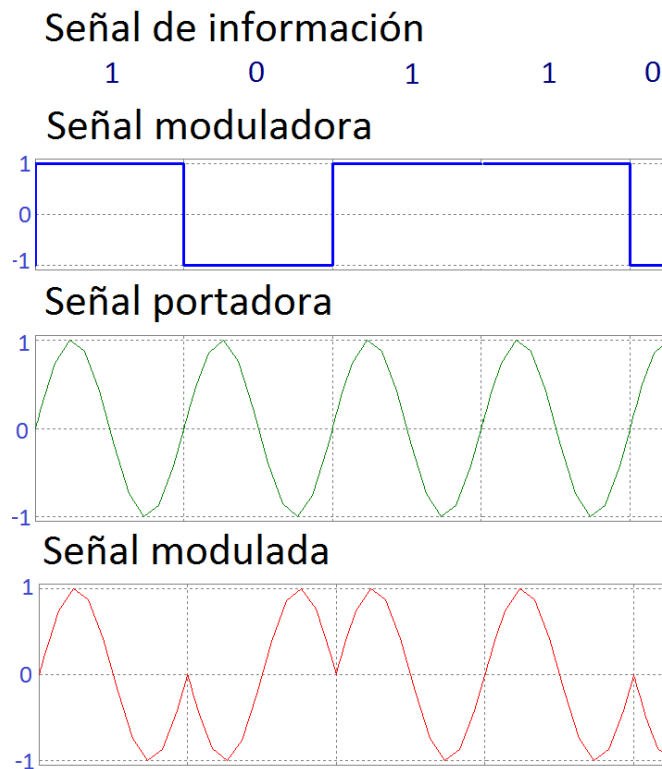


Fig.87: Simulaci3n modulador PSK

En ella se puede observar el resultado de multiplicar una se1al moduladora de dos valores, -1 y 1 para los valores '0' y '1' digital respectivamente, con la se1al portadora de per3odo $10\mu s$ (inversa de la frecuencia). Cuando la informaci3n es un '1', la se1al se representa por la forma original de un per3odo de la se1al portadora y cuando es '0' la invertida de la misma, esto es, desfasada 180° de la original.

Se podr3a haber considerado introducir un modulador que env3e mayor n3mero de s3mbolos como por ejemplo mediante un modulador QPSK o 4PSK, el cual funciona de igual forma que el anterior pero con dos se3ales m3s de informaci3n resultado de desfasar las anteriores 90° , tal y como se observa en la figura 88.

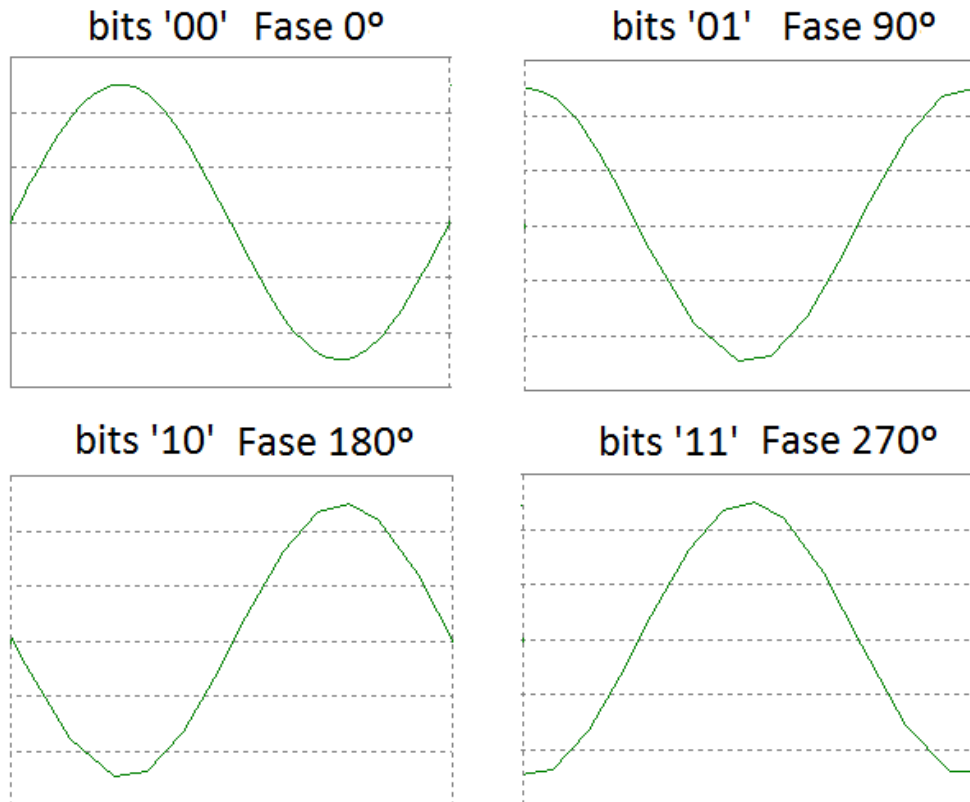


Fig.88: Combinaciones de bits modulador QPSK

No obstante, el modulador PSK responde sobradamente las necesidades requeridas. En la figura 89 se muestra el resultado de introducir el modulador PSK en el sistema fotovoltaico de 100 metros de longitud, figura en la que cada una de las gr3ficas se corresponde con uno de los puntos mostrados en la figura 90.

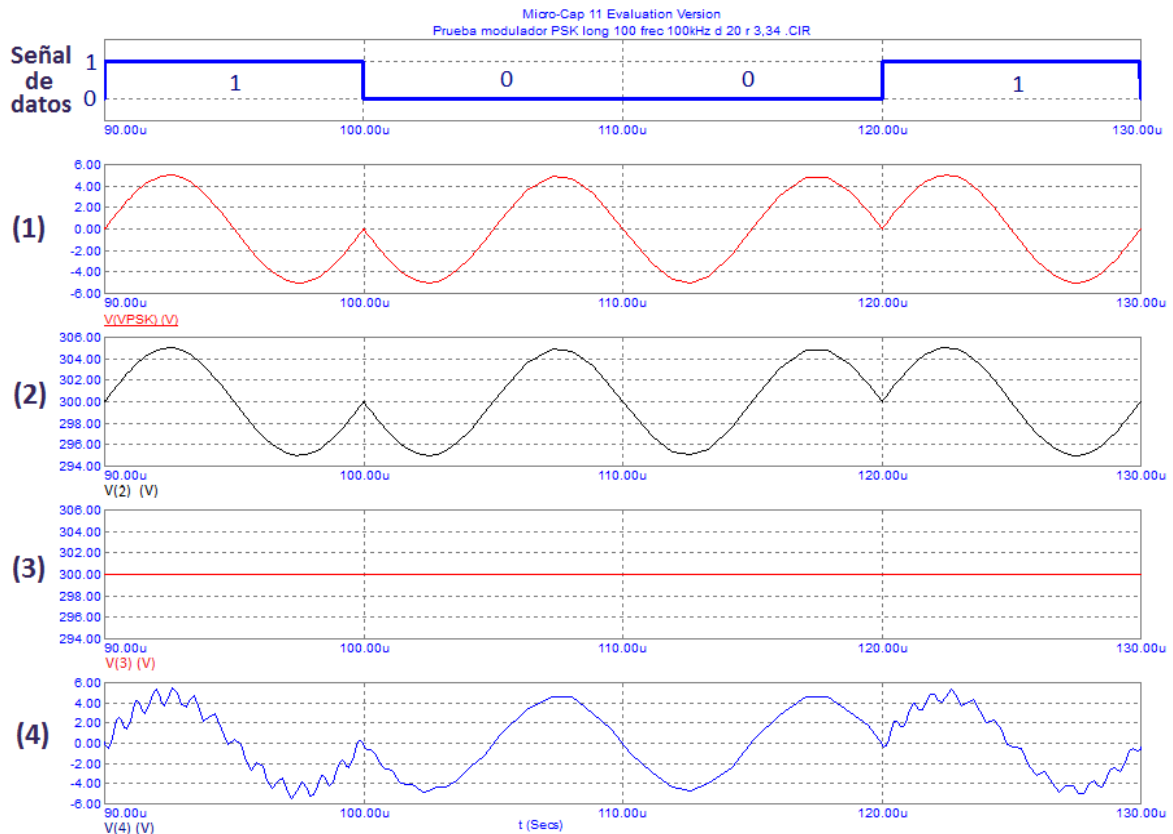


Fig.89: Simulación PLC en sistema solar con modulador PSK

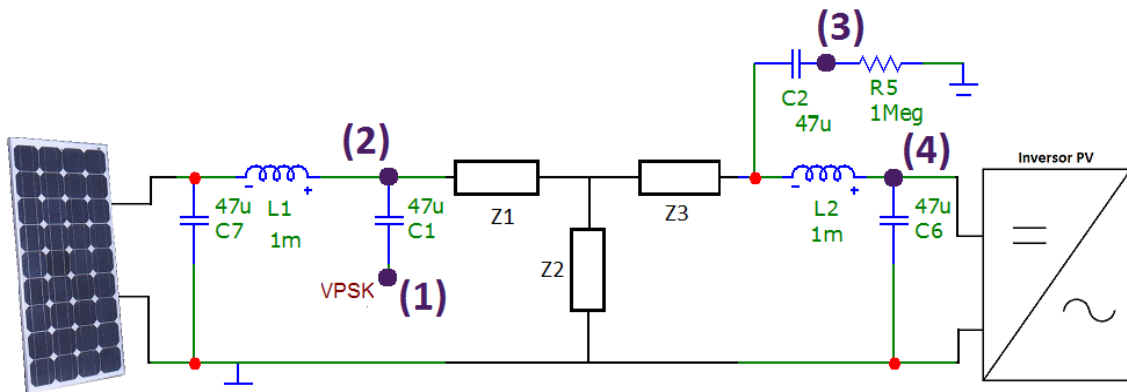


Fig.90: Esquema simplificado con introducci3n de la se3al PSK

En el punto (1) (Fig. 90) se introduce la se3al de informaci3n ya modulada V(PSK) mediante PSK, de ahora en adelante se3al PSK, correspondiente a los bits que aparece en la parte superior como se3al de datos. En 3l se puede apreciar c3mo la se3al modulada para el '0' binario se ve desplazada en fase 180° de la se3al modulada que representa el '1' binario. En el punto (2) es donde tiene lugar la mezcla de se3ales entre la se3al PSK y la se3al de potencia procedente de la cadena de m3dulos fotovoltaicos. La resultante de esta uni3n,

como se ha comentado en repetidas ocasiones, es una se1al id3ntica a la se1al de informaci3n (se1al PSK) viajando sobre la se1al de continua, en este caso de 300V, como es posible apreciar en la gr1fica mostrada como V(2). Una vez que la se1al resultante traspasa los 100 metros de l3nea de potencia del campo solar fotovoltaico se extrae de ella la se1al PSK mediante el filtro utilizado para ello, dando como resultado la se1al V(3). En la recuperaci3n de la misma se puede apreciar el ruido introducido por el canal o l3nea de potencia, que es com3n, y no resulta ser para la detecci3n del bit que se envi3; as3, comparando V(3) con V(PSK), se observa que la atenuaci3n producida en la se1al es m3nima. Por 3ltimo, V(4) representa la se1al de potencia a su llegada al inversor cuya atenuaci3n es tan leve que no es posible apreciarla.

CAPÍTULO 4

Plataforma de Tratamiento Y Visualizacion de datos

En este capítulo se va a presentar el diseño y desarrollo de un sistema para la monitorización de la planta a tiempo real. Este es un valor añadido al trabajo y consta de dos partes bien identificadas, por una parte la tecnología que recibe los datos, demodulados o no (como se decida entregar la información en la etapa previa), realiza el tratamiento de los mismos y los envía hacia la plataforma WEB y, por otra parte, cómo dicha plataforma WEB se encarga de, una vez recibida la información, almacenarla y asociarla a una interfaz gráfica para que pueda ser visualizada mediante una aplicación móvil o página web desde cualquier parte del mundo a tiempo real. El esquema del sistema es el que se recoge en la figura 91:

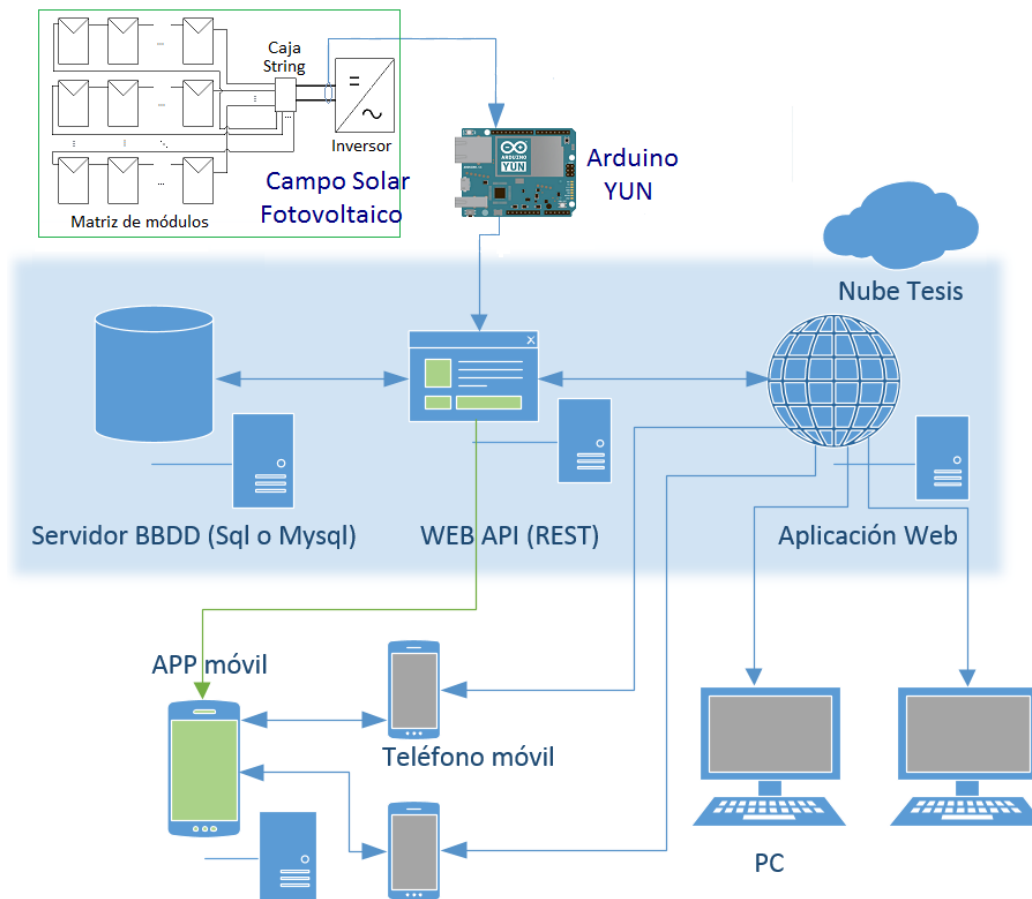


Fig.91: Esquema de la Plataforma de Tratamiento y Visualización de los datos.

En primera instancia aparece el campo solar fotovoltaico, cuyo esquema ya se ha explicado en detalle en capítulos anteriores con el acoplo y el desacoplo de la señal de datos con la información de tensión y corriente de cada una de las cadenas o string de módulos fotovoltaicos. La información, una vez demodulada

(si no está demodulada es necesario realizarlo vía software) es introducida en una tecnología que incorpora un microcontrolador, la procesa y la envía por comunicación inalámbrica mediante WiFi o alámbrica mediante Ethernet a la nube donde se encuentran los servidores WEB. El dispositivo que incorpora esta tecnología es Arduino YUN. La nube es la que contiene los servidores WEB donde es tratada la información. Está compuesto por tres instancias, una es la base de datos donde es almacenada la información, otra con la interfaz gráfica y la última la encargada de tratar la información y asociar dicha información a las tablas y gráficas.

4.1 Arduino para transmisión de datos hacia el servidor WEB

Para el envío de información hacia el servidor WEB se eligió la tecnología Arduino que es una plataforma de hardware libre y posee una gama de dispositivos electrónicos con funcionalidades diferentes en su haber.

El dispositivo principal de Arduino (Arduino UNO), que cuenta con un microcontrolador, el cual convierte un circuito electrónico en un miniPC, que se puede programar para tratar señales procedentes de sensores y obtener información útil a partir de los mismos o también para accionar una serie de salidas o actuadores como pueden ser luces (normalmente LED's) o motores.

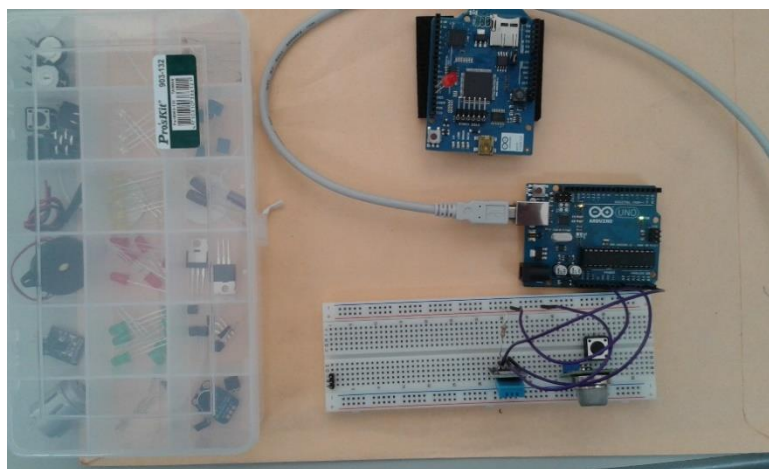


Fig.92 Tecnología Arduino

Por tanto, esta tecnología permite configurar dispositivos electrónicos con un margen de maniobrabilidad importante a través de la programación de un PIC (microcontrolador) mediante el entorno de desarrollo que utiliza el lenguaje “Wiring” basado en “Processing” de código abierto evitando con ello hacer un diseño electrónico exacto y con poco margen para cambios, es decir, con cambiar simplemente el código es posible implementar diversas soluciones.

Otra de las ventajas de Arduino es que dispone de tecnología “Plug and Play” que permite realizar cambios en el código y cargarlo de forma sencilla, como por ejemplo a través del puerto USB, y evaluar el funcionamiento a través de la interfaz gráfica que posee el entorno de desarrollo integrado que posee Arduino. Asimismo Arduino posee una estructura pensada para acoplar tarjetas sobre ella de tal forma que puedan compartir las entradas y salidas simplificando en muchas ocasiones el cableado externo entre ambas. Estas tarjetas reciben el nombre de “Shields” y en ocasiones añaden funcionalidades con tecnología extra, como pueden ser las Shields con bluetooth, GPRS o WiFi o se diseñan para poder acoplar sensores o motores sobre él para simplificar la conexión entre ambos.



Fig.93: Shield GPS de Adafruit

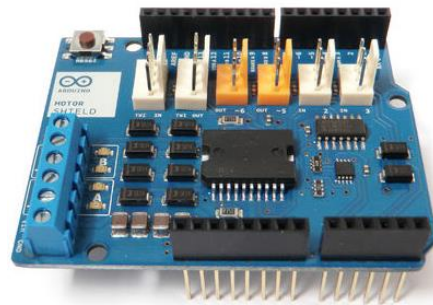


Fig.94: Arduino Motor Shield

Existe una infinidad de tarjetas o shields en el mercado y se debe a la gran producción por parte de los fabricantes para acoplar su propia tecnología sobre Arduino.

Por otra parte, como ya se comentó anteriormente, Arduino posee una gama de dispositivos que integran directamente distintas tecnologías. Para el montaje experimental se ha elegido una de ellas llamada Arduino YUN que

incorpora tecnología ethernet y WiFi para poder enviar datos a otras plataformas vía cable RJ45 o vía inalámbrica respectivamente. Se podría también utilizar alguna de las shields que incorpora módulo GPRS en caso de que no existiera una red cercana para compartir los datos.

Para dominar este tipo de tecnologías es importante conocer ampliamente las posibilidades que ofrece el microcontrolador y su estructura, ya que éste es el cerebro del sistema. El microcontrolador principal de Arduino es el ATmega 328P del fabricante ATMEL y, aunque alguno de la gama de Arduino pueden tener microcontroladores distintos, la mayoría comparte las mismas interfaces y funcionalidades.

3.1 IDE Arduino

El entorno de desarrollo de Arduino presenta una serie de opciones en su menú fácil de manejar. Dentro de los menús t picos presenta una carpeta con ejemplos para poder aprender a hacer configuraciones propias y reutilizar códigos de éstas.

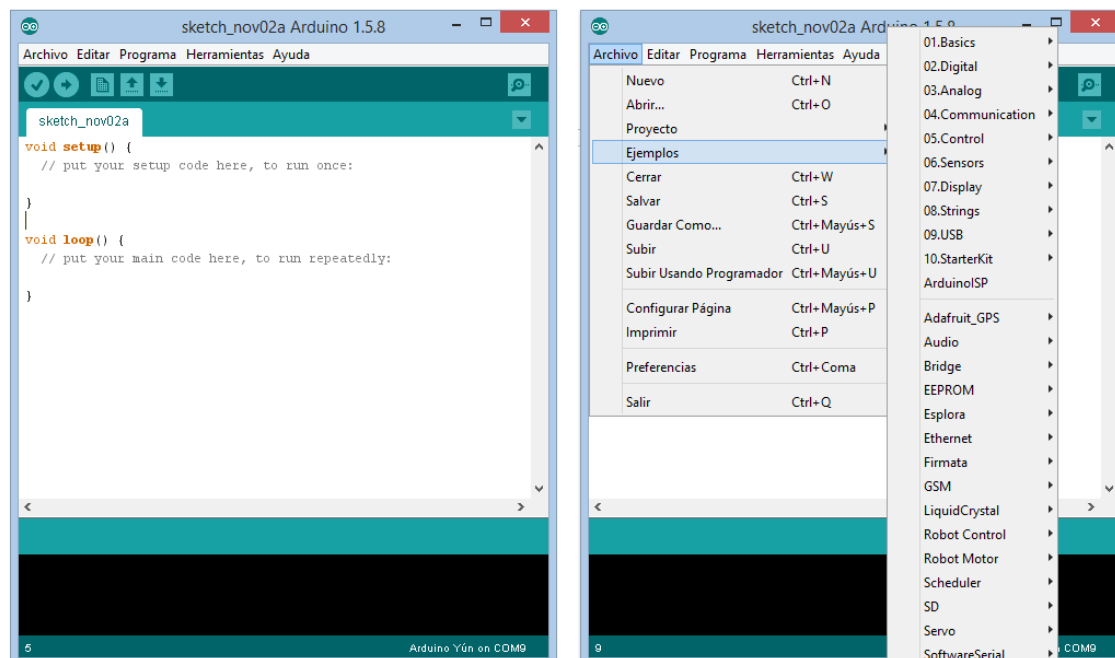


Fig.95: A la izquierda pantalla principal IDE Arduino y a la derecha el menú de ejemplos

En la pantalla principal (Fig. 95), se observa el código que está compuesto por dos partes. Por una parte el “setup” que es donde se declaran las pines de entrada y salida a utilizar, los puertos y la velocidad de éstos y por otra el cuerpo principal “void loop” que se ejecuta de forma cíclica y es por tanto donde hay que especificar la función que se requiere que haga el dispositivo.

Una vez conectada la placa al puerto USB del PC es posible cargar el programa realizado en el microcontrolador de la placa habiendo elegido las opciones adecuadas. Para ello en el menú herramientas hay que elegir el puerto donde está conectado Arduino y la placa conectada porque cada uno tiene un microcontrolador distinto y por tanto la carga del programa se hace de forma distinta.

Cabe mencionar que los microcontroladores de los módulos de Arduino suelen ir dotados con un pequeño programa denominado bootloader que es el que se encarga de cargar el programa en los espacios de memoria convenientes de forma transparente al usuario.

El botón de carga o subir es el representado por una flecha hacia la derecha; no obstante, antes de la carga es aconsejable pulsar sobre la opción de verificar para comprobar que el código esté exento de fallos. Una vez cargado el código de forma satisfactoria en la placa, el entorno facilita el espacio de memoria dinámica y el número de variables RAM utilizadas. Tal y como se observa en la figura 96, la memoria dinámica ocupa un 35% con un total de 898 bytes por las variables globales.



Fig.96: A la izquierda pantalla principal IDE Arduino y a la derecha el menú de ejemplos

Para observar los datos que se est n generando se puede introducir código para verlas por pantalla. Para ello hay que seleccionar el monitor serie en el menú herramientas o pulsar sobre el botón con la imagen de una lupa. En la figura 97 se observa como ejemplo lo mostrado por el monitor serie del código desarrollado para el proyecto.

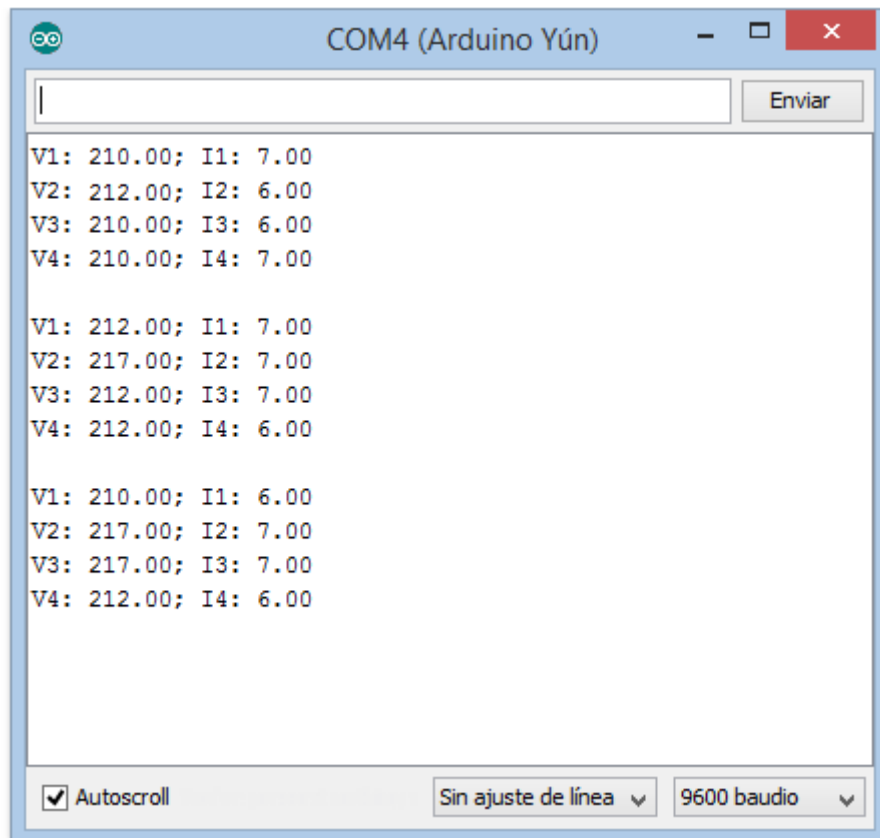


Fig.97: A la izquierda pantalla principal IDE Arduino y a la derecha el menú de ejemplos

Cabe mencionar que en el código se pueden declarar variables globales, constantes, además de incluir librerías y también se puede utilizar procedimientos y funciones, aunque no es aconsejable porque Arduino está pensado para realizar una simulación secuencial.

4.2 Servidor WEB y visualización de los datos en interfaz gráfica

En el servidor WEB es donde se va a elaborar la plataforma para la visualización de la información. Para ello se va a utilizar Thingspeak que es una aplicación web (API web) de “open source” (código abierto) muy popular en internet para la recopilación de datos, almacenamiento y visualización de los mismos. Para poder personalizar la visualización de los datos al antojo del cliente se han usado los servicios de creación de contenido web de WIX. Este mismo ofrece la posibilidad de crear una web básica y responsiva, es decir, cuyo diseño se adapta a todos los tamaños de pantallas posibles de forma dinámica para que la información pueda ser visualizada de forma apropiada según el dispositivo utilizado (PC, Smartphone, tablet o TV) e independiente del navegador usado.

Se ha utilizado Appgeyser para la creación de una aplicación móvil básica que lo único que hace es copiar íntegramente el contenido de la página creada en WIX asemejándose a una aplicación nativa móvil.

De esta forma se utilizan plataformas de creación de open source sin la necesidad de tener que realizar el diseño de una web o base de datos desde el principio ni el de mantener equipos con servidores o espacios en nubes de servidores web con el ahorro del coste que ello conlleva.

De esta forma se van a obtener dos capas, la capa servidor y la capa cliente, en la cual Thingspeak ocupa parte de las dos capas y WIX únicamente la capa cliente. La capa servidor es la encargada de recopilar los datos y de la implementación de los servicios web y la capa cliente se ocupa de la visualización de los datos extraídos de la capa servidor a través de consultas.

La separación del código de servidor y del código de cliente garantiza una arquitectura más escalable e intuitiva para la creación de la aplicación y poder implementar futuras mejoras en el caso de necesitarlas.

4.2.1 Tecnología de la capa de servicios.

En la figura 91 de inicio del capítulo se muestra la estructura del servidor WEB (o capa de servicios), que está compuesta por la siguiente tecnología:

- **API WEB** (de Thingspeak). **Elaborada con REST** (Representational State Transfer), que es un tipo de arquitectura WEB que se apoya totalmente en el estándar HTTP. REST permite crear servicios y aplicaciones que pueden ser usadas por cualquier dispositivo o cliente que entienda HTTP, por lo que es increíblemente más simple y convencional que otras alternativas que se han usado en los últimos diez años como SOAP y XML-RPC.
- **Base de Datos.** La base de datos utilizada en Thingspeak está desarrollada con el sistema de gestión de base de datos MySQL que es a su vez un software libre. Los datos serán recopilados por la API de Thingspeak, la cual permite acceder a ellos en diferentes formatos (XML, JSON y CSV). Thingspeak posee una herramienta de migración de datos que posibilita el tratamiento de los mismos según las necesidades e importarlos en formato excel, access, mysql o sql.

4.2.2 Elección de la tecnología para el desarrollo de la capa de cliente y de presentación:

La tecnología seleccionada para la capa cliente ha sido:

- REST como método de consulta y JSON para el formato de los datos (JSON) para facilitar el acceso y edición de datos desde cualquier entorno, como por ejemplo aplicación WEB (WEB API) y aplicaciones móviles, de una manera rápida y fiable.
- En la capa cliente de Thingspeak se han creado una serie de gráficas con los datos que provee la capa servidor. Las consultas a la capa de servicios la realiza mediante Javascript y Ajax para obtener los datos y aplicarlos a las gráficas

- La página web (aplicación web) se construye usando las herramientas de creación de WIX en la cual se ha embebido las gráficas creadas en la capa cliente de Thingspeak. Ésta, se ha basado para su construcción en los siguientes tecnologías o lenguajes:

- HTML5
- Javascript
- CSS3
- JQuery
- AJAX

4.2.3 Web services (Capa servidor)

Los web services (o servicios web) se encuentran alojados en los servidores de Thingspeak. Éstos son:

Servicio web para el acceso al listado de datos, edición, inserción y borrado mediante método POST (acceso y parametrización de datos a través de url) obteniendo la respuesta en formato JSON. Las peticiones de insertado se realizan desde el dispositivo Arduino YUN.

Se han creado los métodos de selección necesarios para la conexión de la página web de visualización de los datos y la aplicación móvil a los servicios creados.

Las consultas serán parametrizadas de manera que se puedan realizar consultas personalizadas desde la capa cliente, con distintas visualizaciones según los parámetros seleccionados, para así acotar los datos.

Estos datos serán especificados en el servicio web cuyo link es el mostrado a continuación: Esta consulta es la de la capa cliente de thingspeak a la capa servidor de la misma y se muestra en la figura 98.

<http://api.thingspeak.com/channels/67254/field/1.json>



```
{
  "channel": {
    "id": "67254",
    "name": "PLC on PVSS",
    "description": "Tesis doctoral - Caracterización de las comunicaciones PLC en las líneas de corriente continua de un campo solar fotovoltaico.",
    "field1": "V1",
    "field2": "I1",
    "field3": "V2",
    "field4": "I2",
    "field5": "V3",
    "field6": "I3",
    "field7": "V4",
    "field8": "I4",
    "created_at": "2015-11-21T11:22:10Z",
    "updated_at": "2015-11-21T16:36:55Z",
    "last_entry_id": 470,
    "feeds": [
      {
        "created_at": "2015-11-21T15:13:06Z",
        "entry_id": 371,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:13:26Z",
        "entry_id": 372,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:13:46Z",
        "entry_id": 373,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:14:06Z",
        "entry_id": 374,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:14:26Z",
        "entry_id": 375,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:14:46Z",
        "entry_id": 376,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:15:06Z",
        "entry_id": 377,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:15:26Z",
        "entry_id": 378,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:15:46Z",
        "entry_id": 379,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:16:06Z",
        "entry_id": 380,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:16:26Z",
        "entry_id": 381,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:16:46Z",
        "entry_id": 382,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:17:06Z",
        "entry_id": 383,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:17:26Z",
        "entry_id": 384,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:17:46Z",
        "entry_id": 385,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:18:06Z",
        "entry_id": 386,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:18:26Z",
        "entry_id": 387,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:18:46Z",
        "entry_id": 388,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:19:06Z",
        "entry_id": 389,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:19:26Z",
        "entry_id": 390,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:19:46Z",
        "entry_id": 391,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:20:06Z",
        "entry_id": 392,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:20:26Z",
        "entry_id": 393,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:20:46Z",
        "entry_id": 394,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:21:06Z",
        "entry_id": 395,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:21:26Z",
        "entry_id": 396,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:21:46Z",
        "entry_id": 397,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:22:06Z",
        "entry_id": 398,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:22:26Z",
        "entry_id": 399,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:22:46Z",
        "entry_id": 400,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:23:06Z",
        "entry_id": 401,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:23:26Z",
        "entry_id": 402,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:23:46Z",
        "entry_id": 403,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:24:06Z",
        "entry_id": 404,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:24:26Z",
        "entry_id": 405,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:24:46Z",
        "entry_id": 406,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:25:06Z",
        "entry_id": 407,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:25:26Z",
        "entry_id": 408,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:25:46Z",
        "entry_id": 409,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:26:06Z",
        "entry_id": 410,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:26:26Z",
        "entry_id": 411,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:26:46Z",
        "entry_id": 412,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:27:06Z",
        "entry_id": 413,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:27:26Z",
        "entry_id": 414,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:27:46Z",
        "entry_id": 415,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:28:06Z",
        "entry_id": 416,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:28:26Z",
        "entry_id": 417,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:28:46Z",
        "entry_id": 418,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:29:06Z",
        "entry_id": 419,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:29:26Z",
        "entry_id": 420,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:29:46Z",
        "entry_id": 421,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:30:06Z",
        "entry_id": 422,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:30:26Z",
        "entry_id": 423,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:30:46Z",
        "entry_id": 424,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:31:06Z",
        "entry_id": 425,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:31:26Z",
        "entry_id": 426,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:31:46Z",
        "entry_id": 427,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:32:06Z",
        "entry_id": 428,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:32:26Z",
        "entry_id": 429,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:32:46Z",
        "entry_id": 430,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:33:06Z",
        "entry_id": 431,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:33:26Z",
        "entry_id": 432,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:33:46Z",
        "entry_id": 433,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:34:06Z",
        "entry_id": 434,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:34:26Z",
        "entry_id": 435,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:34:46Z",
        "entry_id": 436,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:35:06Z",
        "entry_id": 437,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:35:26Z",
        "entry_id": 438,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:35:46Z",
        "entry_id": 439,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:36:06Z",
        "entry_id": 440,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:36:26Z",
        "entry_id": 441,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:36:46Z",
        "entry_id": 442,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:37:06Z",
        "entry_id": 443,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:37:26Z",
        "entry_id": 444,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:37:46Z",
        "entry_id": 445,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:38:06Z",
        "entry_id": 446,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:38:26Z",
        "entry_id": 447,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:38:46Z",
        "entry_id": 448,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:39:06Z",
        "entry_id": 449,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:39:26Z",
        "entry_id": 450,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:39:46Z",
        "entry_id": 451,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:40:06Z",
        "entry_id": 452,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:40:26Z",
        "entry_id": 453,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:40:46Z",
        "entry_id": 454,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:41:06Z",
        "entry_id": 455,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:41:26Z",
        "entry_id": 456,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:41:46Z",
        "entry_id": 457,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:42:06Z",
        "entry_id": 458,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:42:26Z",
        "entry_id": 459,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:42:46Z",
        "entry_id": 460,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:43:06Z",
        "entry_id": 461,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:43:26Z",
        "entry_id": 462,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:43:46Z",
        "entry_id": 463,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:44:06Z",
        "entry_id": 464,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:44:26Z",
        "entry_id": 465,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:44:46Z",
        "entry_id": 466,
        "field1": "6.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:45:06Z",
        "entry_id": 467,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:45:26Z",
        "entry_id": 468,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:45:46Z",
        "entry_id": 469,
        "field1": "7.00",
        "created_at": "2015-11-21T15:46:06Z",
        "entry_id": 470,
        "field1": "7.00"}
    ]
  }
}
```

Fig.98: Pantalla de resultado del método REST de la Web API de ThinkSpeak. Información de una de las corrientes.

También es posible observar la parametrización en Thingspeak con los datos procedentes de Arduino YUN realizando la consulta desde el servicio web accediendo al siguiente link:

<https://api.thingspeak.com/update?key=1NVRJJDCT9WP00&field1=5&field2=1&field3=1&field4=2&field5=1&field6=1&field7=2&field8=2>

El resultado de este método devuelve el valor ID (471) del nuevo registro insertado, tal y como se muestra en la figura 99:



```
{
  "id": 471,
  "created_at": "2015-11-21T15:46:07Z"
}
```

Fig.99 Pantalla de resultado del método GET de la Web API de ThinkSpeak.

4.2.4 Aplicación web

A continuación se muestra la interfaz gráfica desarrollada en la web para la visualización de los datos:



Fig.100: P3gina principal WEB de monitorizaci3n de datos

Como es posible apreciar el men3 es muy sencillo. Ahora mismo est3 adaptada para un sistema solar fotovoltaico compuesto por 4 cadenas de m3dulos, no obstante este se puede adecuar al n3mero de cadenas que posea la instalaci3n. Pulsando sobre cada una de las pestañas etiquetadas como Cadena 1, 2, 3 y 4 se puede observar a tiempo real los datos de tensi3n y corriente generados por dicha cadena en el instante actual y en las3ltimas horas. Si se deja el rat3n sobre cualquiera de las muestras aparece una caja con el valor de tensi3n o corriente, d3a y hora exacta en la que se tom3 la muestra.

En cada una de las p3ginas aparece la opci3n de visualizar la consulta que realiza WIX a los servidores de Thingspeak mediante tres tipos de formatos: JSON, XML y CSV. Desde este 3ltimo se pueden descargar los datos y visualizarlos en Excel. En la figura 101 se muestra en rojo donde hay que pulsar para descargar el formato CSV con los datos de tensi3n generados dicho d3a en la cadena 1 de m3dulos.

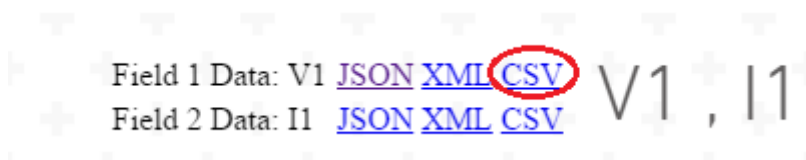


Fig. 101: Link de la web para descargar informe de V1.

En la pestaña de la p3gina web donde aparece extraer datos se ofrece las mismas opciones de visualizaci3n para cada dato y una opci3n extra para la visualizaci3n de todos los datos juntos en un solo formato.

4.2.5 Aplicaci3n m3vil

Como se ha comentado anteriormente la APP m3vil se ha realizado mediante Appgeyser que lo que hace es embeber el contenido de la aplicaci3n web (p3gina web) creada en WIX adaptando su contenido a la dimensi3n del dispositivo.

En las figuras 102 y 103 se muestra la p3gina principal de la aplicaci3n m3vil y el resultado de la misma cuando desplazo la imagen hacia arriba con el dedo para ver el resto del contenido.

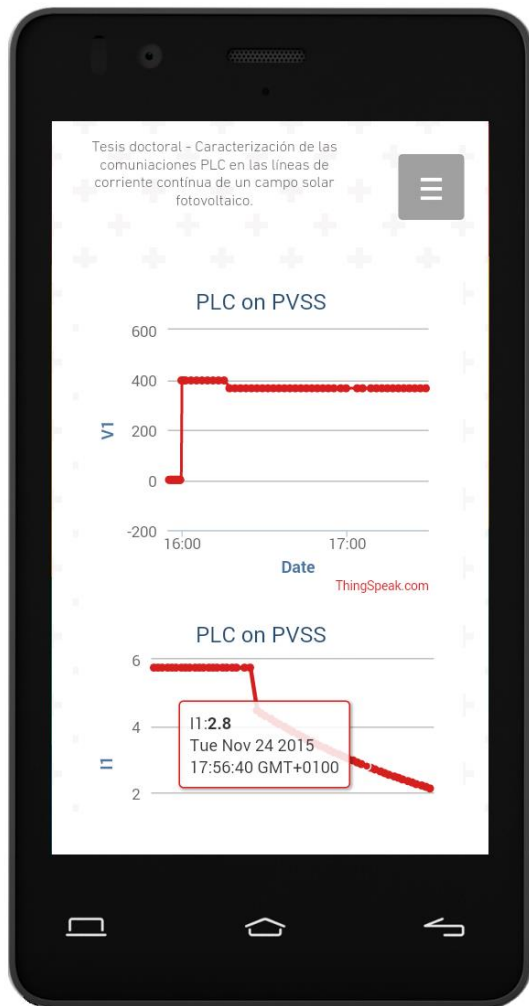


Fig.102: P3gina principal de la APP m3vil.



Fig.103: P3gina principal arrastrada

En la figura 102 se observa c3mo pulsando cualquiera de los puntos de una de las gr3ficas ofrece informaci3n de hora exacta, d3a y tensi3n o corriente generada del dato en cuesti3n. La figura 103 muestra las opciones de visualizaci3n de los datos en distintos formatos pudiendo descargarse el formato CSV. Tambi3n permite compartir los datos en redes sociales.

En la figura 102 aparece un bot3n que si se pulsa ofrece un men3 desplegable que es el mostrado en la figura 105.



Fig.104: Bot3n men3 desplegable



Fig.105: Menú desplegable APP móvil

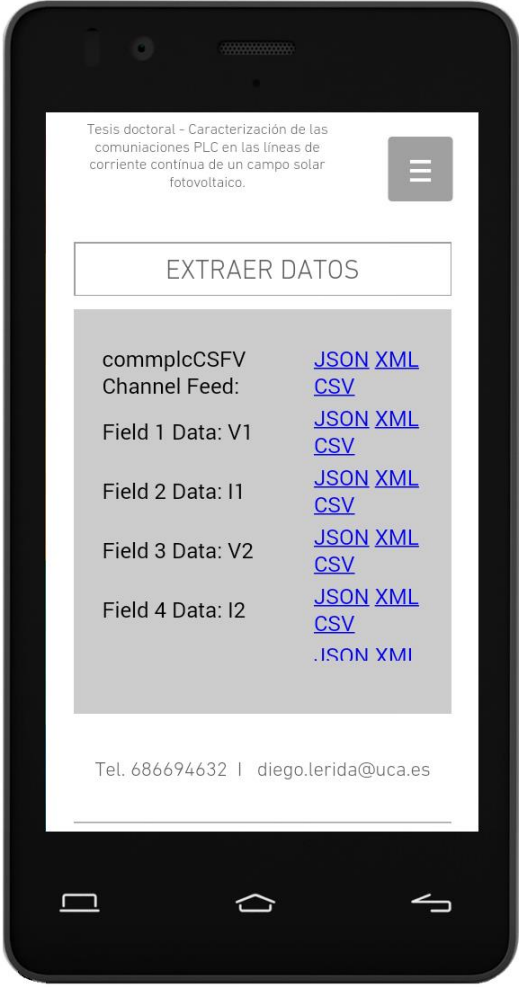


Fig.106: Pantalla de extracción de datos

El menú desplegado ofrece la posibilidad de acceder a otras páginas, en concreto a los datos generados por el resto de cadenas, con interfaz idéntica a la pantalla principal, la página para extraer los datos, que es la mostrada en la figura 106, y la página de contacto.

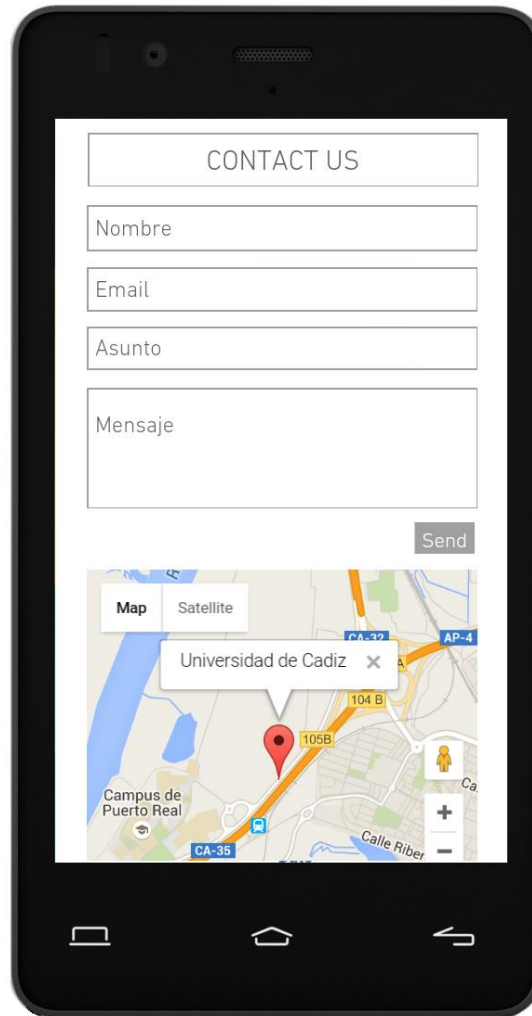


Fig.107: Men3 desplegable APP m3vil

4.3 Programa realizado en Arduino para la transmisi3n de la informaci3n al servidor WEB.

El programa desarrollado en el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino para su ejecuci3n en Arduino Yun ha consistido en el proceso de lectura de los datos de tensi3n y corriente generados en cada una de las 4 cadenas de m3dulos y enviarlos a la API de Thingspeak mediante el m3todo GET. Este m3todo lanza un proceso de parametrizaci3n cada 10 segundos.

A continuaci3n se muestran las partes del c3digo m3s importantes con los comentarios oportunos para su mejor comprensi3n.

```
// Librer3as para la conexi3n como cliente web: Diego Sales L3rida
#include "Bridge.h"
#include "HttpClient.h"

// Librer3as para fijar un tiempo cuando se inicia el programa y poder calcular
la hora actual.
#include "Time.h"

// Cliente del http para poder realizar la petici3n a la url
HttpClient client;

// Variable global con la url para la petici3n a la API de thinkSpeak
String thingspeak_write_API = "http://api.thingspeak.com/update?";

// Variable con la key para la petici3n a la API de thinkSpeak
String thingspeak_write_API_key = "key=1NVR RJFDCT9WP00";

// Variable global con el objeto timer, para controlar el tiempo de realizaci3n
// de cada iteraci3n en el bucle de ejecuci3n
uint32_t timer = millis();

// Inicializaci3n del programa
void setup() {
    Bridge.begin();

    // Inicializaci3n del serial
    Serial.begin(9600);

    //Hora a la que se fija el ejemplo simulado de entrada de datos
    setTime(16,25,00,24,8,2015);
}

void enviarTrama()
{
    // Inicializaci3n de las variables I(corriente) de las cadenas
    float I1 = 0;
    float I2 = 0;
    float I3 = 0;
    float I4 = 0;

    // Inicializaci3n de la variables V(tensi3n) de las cadenas
    float V1 = 0;
    float V2 = 0;
    float V3 = 0;
    float V4 = 0;

    // M3todo para la adquisici3n de los datos de las entradas digitales o
    anal3gicas (las que se considere oportuno). En este caso se ha metido un patr3n
    que simula la campana de Gauss t3pica que tiene la se3al de potencia de un campo
    solar fotovoltaico

    time_t t = now();
    if (hour(t)>= 8 && hour(t) < 19)
    {
        if (hour(t)>= 8 && hour(t)< 13)
        {
            V1=V2=V3=V4= 365.8;
            int minutos= (hour(t)-8)*60+minute(t);
            float factor_escala= 1.75*minutos/300;
            I1=I2=I3=I4= exp(factor_escala);
        }
        if (hour(t)>= 13 && hour(t) < 14)
```

```

{
    V1=V2=V3=V4= 365.8-68.6*(minute(t)/60);
    I1=I2=I3=I4= 5.75 + 2.06*(minute(t)/60);
}
if (hour(t)>= 14 && hour(t) < 15)
{
    V1=V2=V3=V4= 294.9;
    I1=I2=I3=I4= 7.81;
}
if (hour(t)>= 15 && hour(t) < 16)
{
    int minutos=minute(t);
    V1=V2=V3=V4= 294.9 + 68.6 * (minutos/60);
    I1=I2=I3=I4= 7.81 - 2.06 * (minutos/60);
}
if (hour(t)>= 16 && hour(t) < 19)
{
    V1=V2=V3=V4= 365.8;
    int minutos= (hour(t)-16) * 60 + minute(t);
    float factor_escala= 1.75 - (1.75*minutos/180);
    I1=I2=I3=I4= exp (factor_escala);
}

// Obtenci3n de los valores de I(corriente) actuales en el dispositivo
String valorI1 = obtenerValorI(1);
String valorI2 = obtenerValorI(2);
String valorI3 = obtenerValorI(3);
String valorI4 = obtenerValorI(4);

// Obtenci3n de los valores de V(tensi3n) actuales en el dispositivo
String valorV1 = obtenerValorV(1);
String valorV2 = obtenerValorV(2);
String valorV3 = obtenerValorV(3);
String valorV4 = obtenerValorV(4);

// Conversi3n de los valores de I(corriente) a cadena de dos decimales
valorI1 = String(I1, 2);
valorI2 = String(I2, 2);
valorI3 = String(I3, 2);
valorI4 = String(I4, 2);

// Conversi3n de los valores de V(tensi3n) a cadena de dos decimales
valorV1 = String(V1, 2);
valorV2 = String(V2, 2);
valorV3 = String(V3, 2);
valorV4 = String(V4, 2);

// Monta la url completa para la inyecci3n de corrientes y tensiones
String requestString = thingspeak_write_API + thingspeak_write_API_key;
requestString = requestString + "&field1=" + valorI1;
requestString = requestString + "&field2=" + valorV1;
requestString = requestString + "&field3=" + valorI2;
requestString = requestString + "&field4=" + valorV2;
requestString = requestString + "&field5=" + valorI3;
requestString = requestString + "&field6=" + valorV3;
requestString = requestString + "&field7=" + valorI4;
requestString = requestString + "&field8=" + valorV4;

// Controlar que la url no excede del m3ximo para el cliente
if (requestString.length() > 164)
{

```

```

        Serial.println("*****");
        Serial.println("411 ERROR DE LONGITUD DE URL A API DESDE
ARDUINO.");

        Serial.println("*****");
        Serial.println("AVISAR AL DESARROLLADOR DSALES.");

        Serial.println("*****");
    }
    else
    {
        // Crea la conexi3n a la url mediante get
        client.get(requestString);

        // Si hay respuesta la imprimimos
        while (client.available()) {
            char c = client.read();
            Serial.print(c);
        }
    }
}

// M3todo que ejecuta el bucle
void loop() {
    // Controla que se realizar3 la ejecuci3n cada 10 segundos
    if (millis() - timer > 10000)
    {
        timer = millis();
        enviarTrama();
    }
}

// Obtiene el valor de la corriente del m3dulo i
String obtenerValorI(int i)
{
    //Obtenci3n del dato
    ...
}

// Obtiene el valor de la tensi3n del m3dulo i
String obtenerValorV(int i)
{
    //Obtenci3n del dato
    ...
}

```


CAPÍTULO 5

Conclusiones y Consideraciones Generales

La caracterizaci3n de las l3neas de potencia de un campo solar fotovoltaico y los resultados obtenidos durante los ensayos experimentales mediante simulaci3n han servido para extraer diversas conclusiones que muestran el satisfactorio cumplimiento de los objetivos previstos y validando las hip3tesis realizadas. Estas conclusiones son las siguientes:

- Los circuitos de acoplo y desacoplo o red de adaptaci3n de la se1al de informaci3n de entrada al sistema es cr3tico para, no s3lo evitar p3rdidas en la misma, sino tambi3n repercutir negativamente en la se1al de potencia generada en el circuito primario. Por tanto, se desaconseja colocar cualquier elemento que repercuta en la ca3da de tensi3n de la se1al de potencia, como pueden ser elementos resistivos en la red de adaptaci3n.
- Se requiere una correcta y precisa caracterizaci3n del modelo de l3nea como medio para transmisi3n de se1ales de alta frecuencia. Para ello es imprescindible la aplicaci3n de las ecuaciones de Maxwell para la obtenci3n de los par3metros concentrados de la l3nea como bipuerto, mediante el c3lculo de sus par3metros de transmisi3n como son, la impedancia caracter3stica del medio Z_0 y la constante de propagaci3n del mismo γ_0 .
- La transmisi3n de datos a trav3s de las l3neas de un campo solar fotovoltaico con una frecuencia de 100 kHz es adecuada a todo tipo de sistemas solares fotovoltaicos conectados a red independientemente de la magnitud del mismo.
- El empleo de la modulaci3n por desplazamiento en fase o PSK es 3ptimo para la transmisi3n de se1ales en un sistema solar fotovoltaico, dado que el ruido introducido por la l3nea de potencia no es cr3tico en las condiciones m3s desfavorables.

Por último es importante mencionar un par de consideraciones generales, la primera de ellas a tomar en cuenta a la hora de realizar los ensayos experimentales y la segunda como resultado del presente trabajo de investigación.

Consideración 1:

El enfoque idóneo para la caracterización de líneas de transmisión de este tipo ha de ser “**Bottom-up**” (de abajo hacia arriba) puesto que, mediante la aplicación de un modelo teórico y la simulación del mismo haciendo variar sus parámetros, se consigue conocer de forma ajustada el comportamiento del circuito ante la excitación de una señal de entrada. Cabe recordar que en el esquema “Top-down” (de arriba hacia abajo) los parámetros se obtienen a partir de mediciones, por lo que el modelo es propenso a errores de medición, incluyendo los errores introducidos por los aparatos de medida. Además el enfoque propuesto es más versátil y flexible al permitir efectuar cambios en los experimentos con sólo variar sus parámetros mediante formulación.

Consideración 2:

Tras los experimentos realizados, es posible el desarrollo de prototipos electrónicos para su aplicación industrial, uno para la transmisión de información con los datos de generación de las cadenas de módulos fotovoltaicos y, otro para la recepción de los mismos antes de su llegada al inversor fotovoltaico. Estos datos deben ser procesados en el receptor para enviarlos como entrada a la **Plataforma de Tratamiento y Visualización de los datos** desarrollada en el capítulo 4 como valor añadido de la presente tesis doctoral. Cabe recordar que esta plataforma permite que se pueda acceder en tiempo real a la información de generación de tensión y corriente de la planta solar fotovoltaica desde cualquier lugar del mundo con conexión a internet.

CAPÍTULO 6

Referencias Bibliográficas

- [1] We are Social, "Digital, Social & Mobile Worldwide in 2015", Enero de 2015.
<http://wearesocial.net/blog/2015/01/digital-social-mobile-worldwide-2015/>
- [2] Penny Stocks Lab. Aplicación, "Internet in real time".
<http://pennystocks.la/internet-in-real-time/>
- [3] Chilvers I., N. Jenkins, Crossley P., "Development of Distribution Network protection Schemes to Maximise the Connection of Distributed Generation", CIRED 17th International Conference on Electricity Distribution, Barcelona, May 2003.
- [4] Sforna, M., Delfanti, M., "Overview of the events and causes of the 2003 Italian blackout", Power Systems Conference and Exposition, 2006.
- [5] IDAE , "Plan de acción nacional de eficiencia energética 2008-2012", Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Julio 2007
- [6] Comisión de las Comunidades Europeas, "Eficiencia energética: alcanzar el objetivo del 20 %", Comunicación de la Comisión Europea, 13 Nov 2008.
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex:52008DC0772>
- [7] Comisión de las Comunidades Europeas , "Plan de Eficiencia Energética 2011 de la UE", Comunicación de la Comisión, Marzo 2011.
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=uriserv:en0029>
- [8] Secretaría de Estado de Energía, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, "Plan de acción nacional de eficiencia energética 2014-2020". Abril de 2014.
- [9] European Commission, "Technology Platforms from definition to implementation of a Common Research Agenda". 21 Sept 2004.
- [10] European Commission, European Technology Platform SmartGrids, "Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future", 2006.

[11] European Commission, European Technology Platform SmartGrids, "Strategic Research Agenda for Europe's Electricity Networks of the future", Marzo 2007.

<http://www.smartgrids.eu/>

- Documento en el cual se estima como será el avance en los próximos años de las redes inteligentes.

[12] European Commission, European Technology Platform SmartGrids, "Strategic Deployment Document for Europe's Electricity Networks of the Future", Abril 2010.

<http://www.smartgrids.eu/>

- Documento en el cual se explica en qué consiste el desarrollo de las nuevas redes inteligentes

[13] Wenqing Liu, Martin Sigle, and Klaus Dostert, Karlsruhe Institute of Technology, "Channel Characterization and System Verification for Narrowband Power Line Communication in Smart Grid Applications". IEEE Communications Magazine, December 2011.

[14] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDEA, "2º Plan de acción nacional de eficiencia energética 2011-2020", Julio 2011.

[15] Rafael Jiménez Castañeda, "Determinación del diseño y de la eficiencia energética óptima de una instalación fotovoltaica conectada a la red eléctrica", Tesis Doctoral Universidad de Cádiz, Junio de 2005.

[16] Alpha Real. "Proyecto Megawatt"

[17] Photovoltaic Power Systems Programme of International Energy Agency, IEA PVPS, "Snapshot of Global PV Markets 2014", Enero 2015.

[18] Henry Bastidas Moras, "Modelando algunas características de las redes eléctricas usadas como canal para proveer telecomunicaciones", Revista Ingeniería e Investigación vol. 25, nº3, págs: 111-115, Diciembre 2005.

- Aporta un esquema de canal PLC y detalla la diversidad de tipos de ruidos e interferencias que nos podemos encontrar en dicho canal.

[19] Henry Bastidas Moras. “Fundamentos teóricos para el cálculo de los parámetros técnicos de las líneas eléctricas aéreas de baja tensión para su uso en telecomunicaciones”. Revista Ingeniería e Investigación vol.29, nº2, págs: 107-111. AGO2009.

- Magnífico artículo dónde se destacan las formas de caracterizar los parámetros de una línea de potencia.

[20] Eduardo Román, Ricardo Alonso, Pedro Ibañez, Sabino Elorduizapatarietxe, and Damián Goitia, “Intelligent PV Module for Grid-Connected PV Systems”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, nº 4, págs. 1066-1073. Agosto 2006.

- Proponen un esquema de un sistema solar fotovoltaico en el que se pueden realizar transmisiones PLC.

[21] Flavia Grassi, Sergio A. Pignari and Johannes Wolf, “Channel Characterization and EMC Assessment of a PLC System for Spacecraft DC Differential Power Buses”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 53, nº3, págs: 664-675, Agosto 2011.

- Caracteriza un la línea de transmisión de DC de una nave espacial para usar la tecnología PLC.

[22] Eric R. Wade and Haruhiko Harry Asada, “Design of a Broadcasting Modem for a DC PLC Scheme”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 11, nº5, págs: 533-540, Octubre 2006.

- Propone un circuito de acoplo y otro de desacoplo de la señal PLC en líneas de corriente continua en sistemas robóticos y vehiculares.

[23] Comisión de Las Comunidades Europeas, “Recomendación de la Comisión de 6 de Abril de 2005”, Diario Oficial de La Unión Europea, 2005/292/CE.

[24] HomePlug Powerline Alliance, "HomePlug AV White Paper", Document version number: HPAVWP-050818, 2005.

[25] A. B. Vallejo-Mora, J. J. Sánchez-Martínez, F. J. Cañete, J. A. Cortés and L. Díez, "Analysis of In-vehicle Power Line Channel Response", IEEE latin america transactions, vol. 9, NO. 4, Julio 2011.

[26] Sami Barmada, Antonino Musolino, Marco Raugi, and Mauro Tucci, "Analysis of Power Lines Uncertain Parameter Influence on Power Line Communications", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.22, nº4, págs. 1057-1064, Octubre 2007.

- Analiza ciertos parámetros que afectan al rendimiento de en los sistemas de comunicación en líneas de potencia.

[27] Wenye Wang, Yi Xu, Mohit Khanna, "A survey on the communication architectures in smart grid", Computer Networks Vol. 55, nº 15, págs 3604-3629, Octubre 2011.

- Es un resumen del estado actual de las PLC.

[28] H. Meng, S. Chen, Y. L. Guan, C. L. Law, P. L. So, E. Gunawan, and T. T. Lie, "Modeling of Transfer Characteristics for the Broadband Power Line Communication Channel", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.19, nº3, págs. 1057-1064, Julio 2004.

- Describe cómo modelar los parámetros de un canal PLC.

[29] Yu F. Richard; Zhang Peng; Xiao Weidong, "Communication Systems for Grid Integration of Renewable Energy Resources", IEEE Network vol. 25, nº5, Special Issue, Págs: 22-29, Septiembre 2011.

- Describe la situación actual en la que se encuentran las Fuentes de Energía Renovables ligadas con las distintas técnicas de transmisión de datos para su monitorización. En especial se centra en los sistemas fotovoltaicos y puntualiza que la única forma empleada para obtener la más detallada información de los módulos es mediante wireless.

[30] Walter Stefanutti, Stefano Saggin, Paolo Mattavelli and Massimo Ghioni, "Power Line Communication in Digitally Controlled DC–DC Converters Using Switching Frequency Modulation", IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol.55, nº4, págs. 1509-1518, Abril 2008.

- Estudia la modulación por conmutación en frecuencia en convertidores DC/DC, por lo que va ligado con [1].

[31] Michel Chedid, Hans Nilsson, Alf Johansson, JanWelinder, "Realization of an active inductance for a low power high bandwidth DC power line communication network transceiver", AEU-International Journal of Electronics and Communications vol.65, nº11, pág.983, Abril 2011.

- Prepone un transmisor PLC para líneas de corriente continua.

[32] José Antonio Cortés Arrabal, "Modulation and Multiple Access Techniques for Indoor Broadband Power-Line Communications", Tesis Doctoral Málaga, Junio de 2007.

- Ofrece una amplia información sobre la técnica power line communications.

[33] Ever Julián Correa Tapasco, "Análisis de Transmisión de datos usando PLC sobre redes eléctricas de baja calidad", Tesis Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Eléctrica, 2007.

- Ofrece una amplia información sobre la técnica power line communications.

[34] Julian Meng and Xin Ding, "Building Integrated photovoltaic communications using the power line environment", Canadian Solar Buildings Conference Montreal, Refereed Paper. Agosto 2004.

- Hace una comparación entre técnicas de modulación a usar en las líneas de potencia en módulos BIPV.

[35] Behzad Daemi, Ali Abdollahi, Babak Amini, and Farhad Matinfar, "Digitally-Signed Distribution Power Lines: A Solution Which Makes Distribution Grid

Intelligent”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.25, nº3, págs. 1434-1439, Julio 2010.

- Propone una distribución inteligente para los sistemas PLC..

[36] Linyu Wang, Kristof Sleurs, Dagang Li, Geert Deconinck, Emmanuel Van Lil, “Performance Analysis of MAC Layer Protocols in Access BPL for Power Grid Monitoring and Control”, Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009.

- Ofrece una comparación entre tres protocolos de capa MAC que pueden ser usados para monitorización y control de la red eléctrica con la tecnología PLC.

[37] Enrique Ras Oliva, “Teoría de líneas eléctricas”, volumen I. Editorial Marcombo, 1973.

[38] Enrique Ras Oliva, “Teoría de líneas eléctricas”, volumen II. Editorial Marcombo, 1975.

[39] C. Konaté, A. Kosonen, J. Ahola, M. Machmoum, J. F. Diouris, “Power Line Channel Modelling for Industrial Application”. IEEE, Power Line Communications and Its Applications, ISPLC, págs. 76-81, 2008.

[40] Marc Anthony Mannah, Christophe Batard, Nicolas Ginot, and Mohamed Machmoum, “A PLC-Based Method for Data Transmission Over a Pulsewidth-Modulated Network”, IEEE transactions on power delivery, vol. 26, no. 4, Octubre 2011.

[41] J. F. Jiménez-Ortiz, D. Biel. “Estudio y simulación de sistemas de conversión fotovoltaica eléctrica mediante Matlab/Simulink”, Departamento de Ingeniería Electrónica UPC, 2009.

[42] Atul Gupta, Venu Uppuluri Srinivasa, Devendra Paranjape and Nikhil Kashyap, “Low Cost Solution for PLC based Data Monitoring System in

Photovoltaic Plants”, Int. J. on Recent Trends in Engineering and Technology, Vol. 7, No. 2, Marzo 2012.

[43] H. Meng, S. Chen, Y. L. Guan, Member, P. L. So, E. Gunawan and T. T. Lie, “Modeling of Transfer Characteristics for the Broadband Power Line Communication Channel”, IEEE transactions on power delivery, vol. 19, no. 3, Julio 2004.

[44] Ersan Kabalci, Yasin Kabalci, Ibrahim Develi, “Modelling and analysis of a power line communication system with QPSK modem for renewable smart grids”, Internacional journal of Electrical Power and Energy Systems 34, págs. 19–28. 2008.

➤ Modelado Simulink Matlab en líneas de CA con modulador QPSK

[45] Ricardo Orduz Marzal, Miguel Angel Ejido Aguilera, “Contribución a los sistemas de control de potencia micro-distribuida en edificios fotovoltaicos”, Universidad Complutense de Madrid, Julio 2009.

[46] R.Pon Vengatesh, Dr.S.Edward Rajan, “Investigation of Cloudless Solar Radiation With PV Module Employing Matlab-Simulink”, IEEE Proceedings of ICETECT, 2011.

[47] Roberto H. Frediani, Jorge L. Agüero, Eduardo G. Antonelli, María Beatriz Barbieri, “Líneas de Transmisión de Energía”, Notas de curso de la cátedra de “CAMPOS Y ONDAS”, IITREE (Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos),

[48] Julio César Fernández González, Ever Esmith Fuentes López, “Modelo de flujo óptimo de potencia utilizando tecnicas de optimización”, Trabajo de Graduación, Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, Octubre 2011.

[49] Lino Coria Cisneros, “Cálculo de parámetros y operación en estado estacionario de líneas de transmisión”.

[50] Jero Ahola, Antti Kosonen, Francisco Javier Cañete Corripio, Masaaki Katayama, Janne Väänänen, "Power-Line-Communication-Based Data Transmission Concept for An LVDC Electricity Distribution Network – Analysis And Implementation", University of Technology Lappeenranta, December 2013

[51] Henry Bastidas Mora, "Fundamentos teóricos para el cálculo de los parámetros técnicos de las líneas eléctricas aéreas de baja tensión para su uso en telecomunicaciones", Revista Ingeniería e Investigación vol.29 N° 2, págs.107-111, Agosto 2009.

[52] Germán Berterreix, Maximiliano Bonet, Martín Leiva Benegas y Rubén Gómez, "Transmisión de datos por la red eléctrica (PLC) en banda angosta", Universidad Nacional del Comahue, 2006.

[53] Robert E. Collin, "Foundation for Microwave Engineering", 2ª Edición, McGRaw-Hill, 1992.

[54] David M. Pozar, "Microwave Engineering", 3ª Edición, John Wiley and Sons, 2005.

[55] Constantino Pérez Vega, "Líneas de Transmisión", Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones de Universidad de Cantabria.

[56] Jesús M. Rebollar, "Introducción a las guías dieléctricas", Servicio de publicaciones de la Universidad Politécnica de Madrid, 33 páginas, 1988.

[57] José M. Miranda, José L. Sebastián, Manuel Sierra, J. Margineda, "Ingeniería de Microondas: Técnicas experimentales", Practice Hall, 2002.

[58] M.A. Mannah, C. Batard, N. Ginot, M. Machmoun, "Power Line Communication over Feeder Cables in an Industrial Environment", Institut de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nantes Atlantique, IEEE 978-1-4244-3790-0, 2009.

- [59] S. N. Yang ⁽¹⁾, H.Y. Li ⁽¹⁾, M. Goldberg ⁽²⁾, X. Carcelle⁽²⁾, F. Onado ⁽³⁾ and S. M. Rowland, "Broadband Impedance Matching Circuit Design Using Numerical Optimisation Techniques and Field Measurements", IEEE 1-4244-1090-8, 2007.
- [60] Chong-Yeun Park, Kwang-Hyun Jung, Won-Ho Choi, "Coupling Circuitary for Impedance Adaptation in Power Line Communications using VCGIC", IEEE 978-1-4244-1976-0, 2008.
- [61] Manuel Reta-Hernández, "Transmission Line Parameters", Universidad Autónoma de Zacatecas, Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [62] Óscar Torrente Artero, "Curso práctico de formación Arduino", Alfaomega Grupo Editor, México, 582 páginas, Febrero 2013.
- [63] W. Evans, "Arduino Notebook: A Beginner's Reference", Licencia de Creative Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike 3.0. 36 páginas, 1ª edición, Agosto 2007.
- [64] Atmel Corporation-Technologies, "ATMega328P: 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32K Bytes In-System Programmable Flash", 448 páginas.